

Etude de l'influence de la contamination sur l'amorçage des décharges dans les diélectriques liquides

THÈSE

*présentée à la Faculté des Sciences
de l'Université de Genève
pour obtenir le grade de docteur ès sciences, mention physique*

*par
Bernard BOMMELI
de Mauren (TG)*

Thèse N° 1892

1978

GENÈVE
Imprimerie Nationale
1979

Etude de l'influence de la contamination sur l'amorçage des décharges dans les diélectriques liquides

THÈSE

*présentée à la Faculté des Sciences
de l'Université de Genève
pour obtenir le grade de docteur ès sciences, mention physique*

*par
Bernard BOMMELI
de Mauren (TG)*

Thèse N° 1892

GENÈVE
Imprimerie Nationale
1979

La faculté des sciences, sur le préavis de Messieurs M. PETER, professeur ordinaire et directeur de thèse, C. FREI, chargé de cours (Département de physique de la matière condensée - Genève) et H. HOUSE, professeur (City University - Londres) autorise l'impression de la présente thèse, sans exprimer d'opinion sur les propositions qui y sont énoncées.

Genève, le 2 novembre 1978

Le Doyen:

Bernard LEVRAT

Thèse N° 1892



TABLE DES MATIERES

- NOMENCLATURE	4
- RESUME	6
- CHAPITRE 1: INTRODUCTION	7
1.1 GENERALITES	7
1.2 PRESENTATION	8
- CHAPITRE 2: THEORIES	9
2.1 INTRODUCTION	9
2.2 MECANISMES D'AMORCAGE	9
2.2.1 Décharges dans les gaz	9
2.2.2 Décharges dans les diélectriques liquides	11
- CHAPITRE 3: APPAREILLAGE	16
3.1 INTRODUCTION	16
3.2 ELECTRODES	17
3.2.1 Electrodes X-Y	18
3.2.2 Electrodes concentriques	30
3.2.3 Electrode cylindrique	37
3.2.4 Electrode D-V (cylindrique, conique)	38
3.2.5 Electrodes auxiliaires	43
3.3 CONDITIONNEMENT DES MESURES	45
3.3.1 Electroérosion, partie mécanique	45
3.3.2 Electroérosion, partie électrique	47
3.3.3 Générateurs supplémentaires	48
3.3.4 Circuits diélectriques auxiliaires	49
3.4 ELECTRONIQUE GENERALE	50
3.4.1 Electronique d'acquisition des données	50
3.4.2 Electronique de commande	52
3.5 L'ORDINATEUR ET SES PERIPHERIQUES	54
3.5.1 Miniordinateur	54
3.5.2 Périphériques	56
- CHAPITRE 4: TECHNIQUES DE MESURES, MESURES ET RESULTATS	58
4.1 INTRODUCTION	58
4.2 COORDONNES DES DECHARGES	58
4.2.1 Technique de mesure	59
4.2.2 Facteurs de localisation	63
4.2.3 Corrélation entre le délai d'amorçage t et la distance Δr de la précédente décharge	69

4.2.4	Corrélation entre les distributions spatiales et la tension d'arc U_A	72
4.2.5	Evolution temporelle des distributions spatiales des décharges	77
4.3	CONTAMINATION DES DIELECTRIQUES	82
4.3.1	Introduction	82
4.3.2	Contamination naturelle	83
4.3.3	Contamination artificielle	88
4.4	INFLUENCE DE LA CONTAMINATION SUR LES DELAIS D'AMORCAGE	90
4.4.1	Introduction, ordre de grandeur	90
4.4.2	Influence de la nature du contaminant	95
4.4.3	Influence de la granulométrie du contaminant	97
4.4.4	Influence de la concentration de contaminant	98
4.4.5	Stabilité temporelle de la contamination	102
4.5	DELAIS D'AMORCAGE EN FONCTION DE LA GEOMETRIE DES ELECTRODES	108
4.5.1	Introduction	108
4.5.2	Technique de mesure	109
4.5.3	Délai moyen inversement proportionnel à la surface A des électrodes	111
4.6	MODIFICATIONS DES DELAIS MOYENS D'AMORCAGE PAR LE MOUVEMENT RELATIF DU DIELECTRIQUE PAR RAPPORT AUX ELECTRODES	114
4.6.1	Introduction	114
4.6.2	Technique de mesure	116
4.6.3	Distribution des délais d'amorçage indépendante de la pression hydrostatique du milieu de claquage	118
4.6.4	Comportement de τ_{exp} en fonction du mouvement du diélectrique	121
4.6.5	Comportement de τ_f en fonction du mouvement du diélectrique	125
4.7	INFLUENCE DE LA TENSION D'AMORCAGE U_B SUR LES DELAIS MOYENS τ_{exp}	130
- CHAPITRE 5:	DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS, MESURES COMPLEMENTAIRES	132
5.1	DISCUSSION DES MESURES EN FONCTION DES TENSIONS DE CLAQUAGES	133
5.1.1	Comparaison de nos résultats avec les mesures dans les diélectriques contaminés	133
5.1.2	Représentation des résultats	134
5.1.3	Gap virtuel	136

5.2	DISCUSSION DES MESURES EN FONCTION DU MOUVEMENT DU DIELECTRIQUE	139
5.2.1	Interprétation des résultats	139
5.2.2	Nature des temps formatifs	140
5.2.3	Mesures complémentaires	144
5.3	DISCUSSION DES MESURES EN FONCTION DE LA SURFACE A DES ELECTRODES	148
5.3.1	Introduction	148
5.3.2	Extension de la surface des électrodes par celle des particules du contaminant	148
5.3.3	Mesures tests	154
5.4	EXTRAPOLATION DES RESULTATS ET CONCLUSIONS	157

- REMERCIEMENTS	158
- BIBLIOGRAPHIE	159

N O M E N C L A T U R E

A	aire, surface
α	premier coefficient de Townsend
B	induction magnétique
BN	tension d'arc faible: arc de type bas niveau
C	concentration volumique de contaminant dans l'huile
c	capacité d'un condensateur
cct	court-circuit
γ	deuxième coefficient de Townsend
d	distance
D	débit d'injection du diélectrique
D_{Li}	degré de localisation d'ordre i
E_B	champ électrique de claquage
EHD	électrohydrodynamique
ϵ	permittivité du diélectrique
f	fréquence
g	gap, distance frontale d'étincelage
H	champ magnétique
η	viscosité du diélectrique
i	indice
I	courant moyen dans les électrodes
I_a	courant durant un arc
μ	perméabilité magnétique
N	nombre ... (...de décharges, ... de spires)
v	facteur d'amplification du champ électrique
n	nombre d'électrons
p	pression hydrostatique dans le milieu de claquage
p-v	pression-vitesse
q	charge électrique
r	rayon
R	résistance
ρ	masse volumique
S	section (m^2)
t	temps ou délai d'amorçage d'une décharge
T	température

T_A	durée d'un arc
T_I	durée de l'interruption entre la fin d'un arc et la montée de la tension pour le prochain claquage.
T_{II}	décharge de type I (c.f. 4.2.4.1)
T_{II}	décharge de type II (c.f. 4.2.4.1)
τ	moyenne d'un temps, d'un délai.....
τ_{exp}	 d'amorçage (appelé τ avant la connaissance de τ_f)
τ_f	 d'amorçage le plus fréquent, temps formatif
U_A	tension entre les électrodes, durant un arc
U_B	tension entre les électrodes juste avant l'amorçage
v	vitesse relative moyenne entre électrodes et diélectrique
ω	vitesse angulaire
X, Y	coordonnées d'une décharge

R E S U M E

Nous avons mesuré les délais moyens de claquage et la position des arcs dans des diélectriques liquides, dans un champ électrique homogène, sous de faibles tensions d'amorçage (≤ 250 V). Nous avons constaté que le claquage est énormément facilité par la présence dans le liquide d'une faible concentration volumique C ($C \approx 10^{-3}$) de fines particules, pour autant qu'elles soient conductrices. Si ces particules sont créées par des claquages répétitifs, leur influence ne décroît pas au cours du temps, pour des temps compris entre 1 ms et plusieurs jours. Le délai moyen τ et la concentration C sont en première approximation liés par l'équation $\tau \cdot C \approx \text{constante}$; cette "constante" est fixée par les conditions expérimentales. De même, pour un champ homogène s'étendant entre deux électrodes d'aires A , nous avons mesuré: $\tau \cdot A = \text{constante}$. La granulométrie des particules influence le délai d'amorçage: à concentration C constante, des particules plus fines facilitent d'autant plus le claquage. Nous n'avons pas détecté d'influence de la pression p sur les délais d'amorçage ($1 \leq p \leq 20$ bar). Un mouvement relatif de faible vitesse moyenne v entre l'électrode et le diélectrique ($v \approx \text{cm/s}$) introduit un délai d'amorçage minimum que nous avons interprété comme un temps formatif des conditions facilitant l'amorçage. Ce temps formatif τ_f augmente si le gap augmente, cet effet semble moins marqué pour des tensions d'amorçage plus élevées. ($0 \leq \tau_f \leq 400 \mu\text{s}$). τ_f semble indépendant de C (!). La contamination du diélectrique a pour conséquence que les délais moyens ne sont pas seulement fonction du champ électrique, mais, en plus, du gap ou de la tension de claquage. Pour concilier quantitativement notre facilité d'amorçage avec les résultats dans des diélectriques purifiés, nous avons introduit la notion d'"ordre" dans le diélectrique. Dès que l'on désire préciser cet "ordre" (statique ou dynamique) on se heurte apparemment à des contradictions. En tenant compte de la surface propre des particules dans le champ renforcé qui les entoure (émissivité) on arrive presque à une concordance entre délais dans un diélectrique contaminé et délais dans un diélectrique filtré.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 GENERALITES

Le claquage dans les diélectriques liquides s'étudie dans de nombreux laboratoires, dans le but d'expliquer le ou les mécanismes physiques qui régissent ce phénomène. La finalité de ces travaux est généralement une meilleure protection contre un amorçage fortuit qui est alors considéré comme un phénomène parasite. Ces recherches se font par des approches très différentes: les unes étudient la mobilité des porteurs de charge, la conduction, les autres, l'amorçage; elles se font dans des diélectriques très différents: eau, huile plus ou moins purifiée, ou encore dans des diélectriques cryogéniques. Cette richesse d'approche vers un but unique (y-a-t-il une solution unique ?) se retrouve dans la diversité des résultats publiés, qui, par conséquent, sont rarement comparables et quelquefois même apparemment incompatibles.

Le chemin suivi par notre laboratoire pour arriver à ce but est quelque peu différent: au lieu de purifier le milieu d'amorçage, nous facilitons le claquage par l'introduction dans l'huile de divers contaminants. Ce travail de thèse s'inscrit dans ce contexte général, il fait suite aux récents travaux de Monsieur U. Rudolf {1} qui s'est plus particulièrement intéressé à l'aspect statistique des décharges, et qui a développé une installation relativement complexe pour l'acquisition des données, installation que nous utiliserons largement.

Notre but consiste plus particulièrement à trouver les paramètres qui influencent la facilité d'amorçage, surtout les grandeurs qui caractérisent l'effet du contaminant: nous aimerions expliquer cet effet.

1.2 PRESENTATION

Nous avons rarement mis en évidence un résultat ou une quelconque corrélation à la suite d'une mesure unique ou d'une seule expérience. Généralement, nous procédions par recouvrements de tests très divers. Cette procédure expérimentale quelque peu "entremêlée" ne facilite pas une présentation très directe, qui serait pourtant souhaitable pour sa clarté et sa concision. Nous allons donc démêler un peu artificiellement les imbrications expérimentales et présenter séparément nos divers résultats, si faire se peut, dans un ordre voisin de l'ordre chronologique; le chapitre 3 décrit l'appareillage de manière très détaillée. Le chapitre 4 est la partie principale de ce travail, il décrit les résultats et les procédures expérimentales utilisées. Le dernier chapitre sera le plus intéressant puisque nous y discuterons et interpréterons les résultats, voire les confirmerons par des expériences complémentaires. Nous ferons ressortir les contradictions qu'il reste à éclaircir.

CHAPITRE 2

THEORIES

2.1 INTRODUCTION

Dans la présentation sommaire du chapitre 1, nous n'avons volontairement pas parlé, ni qualifié cette partie "théorique" de la thèse. Elle n'est pas satisfaisante, car LA théorie n'existe pas actuellement pour les diélectriques liquides, raison pour laquelle le titre ci-dessus est au pluriel. Nous aurions préféré parler de "bibliographie" plutôt que de "théories" car nous n'entrerons pas dans le détail des modèles existants mais nous ne pourrions être exhaustifs. Certains auteurs de modèles décrivent un processus d'amorçage observé dans des conditions particulières, mais ils ne cherchent pas, apparemment, à confronter leurs observations à celles d'autres chercheurs. Il est des publications intéressantes qui, par exemple, ne mentionnent pas la valeur de certains paramètres qui influencent le claquage ou ne précisent pas suffisamment les conditions expérimentales. Ces remarques ne sont que le reflet et la conséquence de l'absence d'une théorie des claquages dans les diélectriques liquides. Elles sont d'ailleurs partiellement valables pour ce travail, nous n'avons, par exemple, pas parlé de la teneur en oxygène du diélectrique.

2.2 MECANISMES D'AMORCAGE

2.2.1 DECHARGES DANS LES GAZ Beaucoup de modèles de claquage dans les diélectriques liquides sont basés sur un amorçage dans un gaz dont nous donnons les idées fondamentales ci-après.

La décharge est obtenue par une multiplication (avalanche) des électrons accélérés dans le champ électrique appliqué. Ce champ constant doit les accélérer suffisamment pour qu'ils puissent ioniser des molécules de gaz qu'ils rencontrent. N_0 électrons initiaux quittant la cathode donneront n électrons à l'anode:

$$n = n_0 e^{\alpha d}$$

où α (1er coefficient de Townsend) est la probabilité d'ioniser par unité de longueur et par électron.
- d est la distance anode-cathode

Pour que la décharge soit entretenue (autonome), il faut extraire de la cathode un nombre n_c d'électrons par unité de temps défini par:

$$n_c = n_0 + \gamma (n - n_c)$$

où γ est la probabilité d'arracher un électron (secondaire) à la cathode par paire d'ions formés dans le gaz (2ème coefficient de Townsend)

Le taux n_c d'électrons extrait de la cathode donne finalement par multiplication un courant constant d' n électrons arrivant à l'anode:

$$n = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)}$$

Cette expression simple est en bon accord avec l'expérience. Elle a été améliorée en tenant compte de la distribution des vitesses des électrons, de la probabilité d'ioniser les molécules de gaz (Emeleus, Von Engel 1932).

On retrouve la loi de Paschen si l'on tient compte de la formule empirique:

$$\alpha = p \cdot A e^{-Bp/E_B}$$

où p est la pression du gaz

$E_B = \frac{U}{d}$ le champ électrique de claquage

A et B des constantes fixées expérimentalement pour un gap donné

U_B est la tension de claquage entre les électrodes

$$U_B = \frac{B p d}{\ln(p \cdot d) + \ln \frac{A}{\ln(1 + \frac{1}{\gamma})}}$$

Paschen

Pour un gaz donné, la tension de claquage U_B n'est fonction que du produit pd . Elle passe par un minimum en fonction de $p.d.$. Par exemple, pour de l'air, le minimum de $U_B = 327$ V se trouve à $pd = 7,6$ bar. μ m.

Partant d'un point de vue corpusculaire, on peut calculer le courant d'une décharge en fonction du temps, pour autant qu'il y ait des électrons primaires (ce qui n'est pas probable dans un diélectrique liquide).

Pour de grands produits $p.d.$, l'équation de Paschen décrit mal les résultats expérimentaux. On corrige alors le champ électrique en tenant compte de la charge d'espace des électrons et des ions, ce qui a pour conséquence d'accélérer fortement l'avalanche: on parle alors de streamer. Ce mécanisme intervient pour une charge d'espace créée par $\sim 10^8$ électrons.

2.2.2 DECHARGES DANS LES DIELECTRIQUES LIQUIDES

2.2.2.1 Paramètres influençant le claquage. Il existe de nombreux paramètres expérimentaux qui influencent le claquage dans les diélectriques liquides, difficiles à classifier car souvent interdépendants, fonction du temps, du lieu ou même des événements qui ont précédé la mesure. Leur importance relative est très variable; nous en énumérons les principaux ci-après:

- Diélectrique : nature chimique, pureté.
- Température et pression hydrostatique du milieu de claquage, mouvement relatif de ce dernier par rapport aux électrodes.
- Paramètres géométriques: dimension des électrodes et du gap, configuration du champ électrique.
- Electrodes: matériaux, traitements et état de surface.
- Procédure expérimentale (!): procédé d'application du champ électrique (polarité, impulsion, rampe de tension éventuellement alternative, fréquence, etc...)

La dispersion des mesures est fonction de la maîtrise des paramètres précités, à défaut d'être parfaitement domptés il faut pour le moins surveiller l'évolution de ces derniers.

2.2.2.2 Procédure expérimentale. La reproductibilité des résultats de mesures est un critère important pour le choix d'une procédure expérimentale. Cette reproductibilité peut être classifiée en plusieurs catégories: elle peut être qualitative ou quantitative, de plus, dans ces deux catégories, elle peut être transmissible d'un laboratoire à un autre ou non transmissible. Ces degrés de reproductibilité n'influencent malheureusement pas assez les chercheurs dans le choix de la procédure de mesure de la rigidité des diélectriques liquides.

Partant de ces critères et de l'aspect statistique des claquages dans les diélectriques liquides, il y a des configurations d'électrodes qu'il faut écarter (par exemple pointe contre plan). De même, certaines procédures expérimentales sont moins favorables (par exemple la mesure d'une tension de claquage). Ce choix n'est malheureusement pas toujours possible, la réponse à certaines questions passe par des méthodes expérimentales moins bonnes par rapport aux critères précédents. D'un point de vue économique, ces critères sont également très favorables, il faut probablement chercher dans les motivations humaines (commodité, habitude) les raisons de la trop lente conversion à des procédures expérimentales plus généreuses et plus efficaces.

2.2.2.3 Modèles de claquage. L'arc électrique, stade final d'un amorçage est assez bien connu. Les différentes descriptions du déroulement des événements physiques qui mènent à l'arc sont partiellement vérifiées par les expériences, mais plus on revient en arrière dans le temps, plus les explications divergent.

- Avalanche. Ce modèle est inspiré des décharges dans les gaz (Lewis, Adamczewski, 1957). Dans ce modèle, les électrons primaires sont émis par la cathode et multipliés dans

le diélectrique. Les électrodes et la nature du diélectrique jouent un rôle important dans ce modèle, faits vérifiés expérimentalement. Avec ce modèle, on peut définir, comme pour les gaz, un critère de claquage (Swan, 1961), il a été partiellement vérifié dans le diélectrique cryogénique.

- Inhomogénéité thermique (Watson Sharbaugh, 1960). De petites aspérités sur la surface des électrodes concentrent le courant qui traverse le diélectrique, il s'en suit un échauffement local qui vaporise le diélectrique, la bulle grandit, elle modifie le terme p.d de Paschen, ce qui permet le claquage dans la bulle, puis dans le diélectrique. Cette approche de l'arc trouve une bonne confirmation expérimentale en regard des paramètres "pression" et "température", et de la nature du diélectrique.
- Bulle La présence de bulles (Kao, 1960, Krasucki, 1966) ou la formation de bulles à la cathode (Thomas, 1973) a été invoquée pour expliquer l'amorçage.
- Particules La présence d'impuretés a également été invoquée pour expliquer l'amorçage dans les diélectriques liquides, particulièrement dans les hydrocarbures. D'après Kok { 2 } , les diélectriques contiennent toujours des particules de contaminant. Leurs dimensions sont très variables, elles s'étendent entre la taille des molécules du diélectrique et plusieurs dizaines de microns. La rigidité des diélectriques est fonction de cette taille, qui varie au cours du temps: floculation plus ou moins rapide des colloïdes. Ces particules se déplacent dans le champ électrique, s'alignent et forment des ponts, si leur permittivité est plus grande que celle du diélectrique. Compte tenu de la vitesse de diffusion des particules qui s'oppose à leur tendance à s'aligner dans un champ électrique inhomogène, Kok propose un critère de claquage qui relie température, permittivité, dimension des particules et champ de

claquage. Il y a des amorçages partiels le long ou entre les ponts, avec vaporisation du diélectrique (effet Joule ? électrolyse ?). Le claquage a finalement lieu dans ces bulles. Ce modèle contient certaines idées séduisantes, sous d'autres aspects, il est en contradiction avec les résultats expérimentaux.

2.2.2.4 Caractère statistique du claquage dans les liquides

Cet aspect caractéristique du claquage dans les diélectriques liquides a été étudié par de nombreux chercheurs (initialement Saxe et Lewis, 1955). Ce n'est pas une explication physique de l'amorçage, mais tout modèle devra satisfaire cet aspect du problème.

L'amorçage d'une décharge dans un diélectrique liquide soumis à un champ électrique intervient après un délai t . Ce délai d'amorçage se décompose en deux parties: la première est de caractère aléatoire, c'est le temps qu'il faut attendre pour que l'amorçage débute. (On utilise malheureusement souvent le terme "délai statistique" t_s). La deuxième est le temps qu'il faut

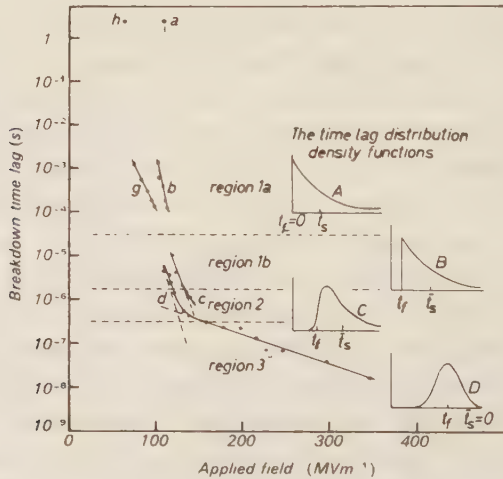


FIG. 3.27. The stress dependence of the time lag and its distribution function. Experimental points: *a, h* Brignell (1964); *b, c, g*, Lewis and Ward (1962); *d, e* Beddow (1968) (after Beddow, Brignell, and House 1968).

pour former la décharge à partir de l'évènement initial qui marque le début de l'amorçage, on parle en terme de "temps formatif " t_f . La distribution des délais d'amorçage varie suivant les grandeurs relatives de t_f et t_s . Un résumé de ces distributions pour diverses plages de champ électrique est donné dans le livre de Gallagher { 3 } dont nous avons tiré la figure de la page précédente.

CHAPITRE 3

APPAREILLAGE

3.1 INTRODUCTION

L'aspect statistique des grandeurs physiques caractérisant une décharge dans un diélectrique contaminé nécessite un grand nombre de mesures élémentaires, difficilement réalisables sans faire largement appel à l'automation et à l'informatique. Il serait en effet impensable de vouloir mesurer simultanément par des méthodes traditionnelles un ou plusieurs paramètres d'un claquage alors que ces derniers se succèdent à des fréquences pouvant aller jusqu'à 100 KHz.

Dans ce chapitre, nous décrirons plus en détails, les divers éléments de l'appareillage symbolisé dans la figure 3.1.0.1.

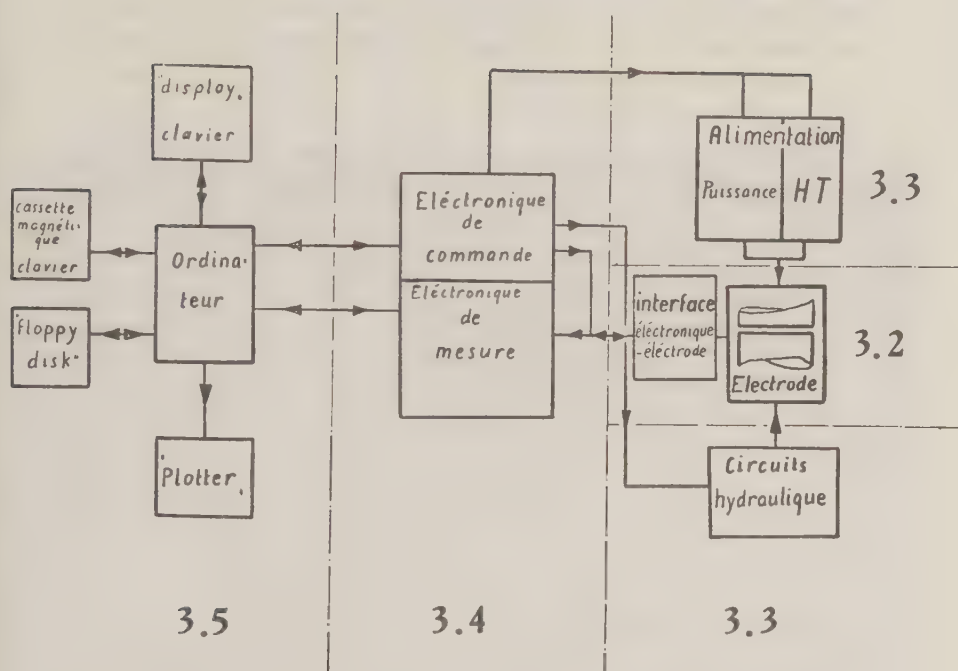


fig. 3.1.0.1 Schéma bloc de l'appareillage. (La numérotation se réfère au paragraphe du chapitre 3 qui décrit ce composant).

3.2 ELECTRODES

Dans ce paragraphe, nous décrivons les diverses électrodes de mesure et l'électronique spécifique à ces dernières, appelée dans les pages suivantes "interface électrode-électronique".

Tous les couples d'électrodes développés lors de ces recherches génèrent des champs électriques macroscopiques homogènes $\vec{E}$, car la surface active de l'anode est parallèle à celle de la cathode. De plus, cette surface est plane, excepté pour les électrodes "P-V" pour lesquelles elle est conique: le rayon du cône étant beaucoup plus grand que la distance

séparant les électrodes, le champ $\vec{E}$ reste donc pratiquement homogène. Ce champ électrique (qui provoque le claquage) n'est homogène que dans la mesure où l'on néglige les effets de bords: cette approximation est généralement justifiée avec nos électrodes, car l'étendue de l'aire de claquage, typiquement de quelques centimètres de côtés, est beaucoup plus grande que la distance séparant l'anode de la cathode qui est au maximum de quelques dizaines de microns.

Nous avons réalisé divers couples d'électrodes, à champ $\vec{E}$ homogène, différents les uns des autres par des considérations:

1. géométriques: surface(s) active(s) (soumises au champ électrique $\vec{E}$), injection du diélectrique, mesure ou conditionnement de l'emplacement du claquage, etc.
2. physiques: matériaux des électrodes, état de surface, etc.

3.2.1 ELECTRODES "X-Y" Avec le couple d'électrodes "X-Y", on désire mesurer, en plus des autres paramètres caractérisant une décharge, sa position, c'est-à-dire les coordonnées X et Y de la décharge dans le plan du gap séparant anode et cathode. Ce n'est malheureusement pas possible par une mesure directe (caméra rapide). En effet, l'huile contaminée n'est plus transparente, et de plus, le gap, compris entre environ 20 et 100 microns, est trop petit par rapport aux dimensions des électrodes planes (un champ électrique homogène est indispensable, si l'on ne veut pas influencer la position à mesurer) qui sont typiquement de l'ordre de quelques centimètres.

3.2.1.1 Corps de l'électrode L'emplacement du claquage peut être déterminé indirectement en détectant la position du courant de l'arc I_{arc} qui le succède. Pour ce faire, nous avons substitué les électrodes massives par des électrodes subdivisées en plaques minces, isolées les unes des autres, chaque

plaque étant reliée à un détecteur de courant. Sur l'une des électrodes, nous mesurons la coordonnée "X", sur l'autre "Y" car l'orientation des plaques de l'anode est perpendiculaire à celle de la cathode. (c.f. fig. 3.2.1.1 et 3.2.1.2)

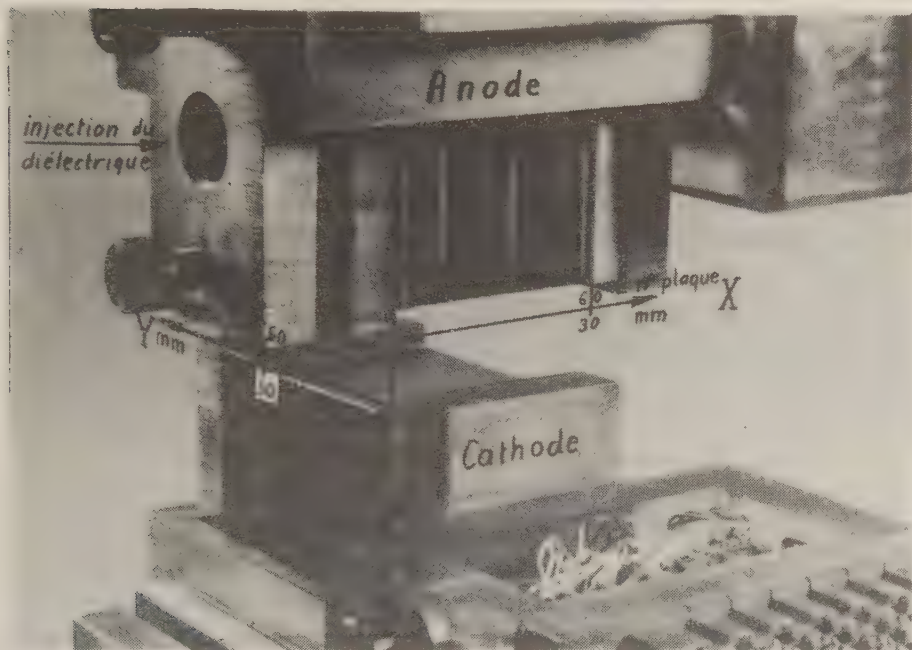


fig. 3.2.1.1 Electrodes. Lors d'une mesure, la distance séparant l'anode de la cathode est ramenée typiquement à quelques dizaines de microns.

Par ce montage on réalise donc un quadrillage du plan du gap qui permet de mesurer les positions spatiales des décharges au cours du temps.

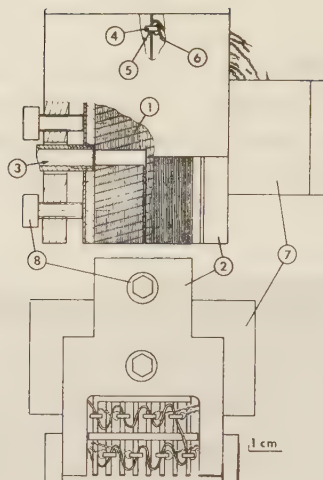


fig. 3.2.1.2 Couple d'électrodes X-Y :
 1) plaques de mesures. 2) Support. 3) Orifice
 pour l'injection centrale du diélectrique.
 4) Tore ferromagnétique de détection du courant
 d'arc. 5) Fil du courant de polarisation.
 6) Fil du signal de lecture (secondaire). 7)
 Connecteurs pour l'ensemble des signaux de
 lecture. 8) Vis de blocage.

La position des décharges est évidemment fonction du champ électrique local. Entre deux électrodes planes parallèles, le champ macroscopique est homogène; avec nos électrodes subdivisées, ce n'est plus le cas: il apparaît une intensification du champ le long des arêtes des diverses plaques constituant l'anode et la cathode (effet de pointe). Cette inhomogénéité du champ électrique sera d'autant plus faible que l'isolant séparant les plaques est mince, puisque ces dernières sont toutes au même potentiel. Nous avons contrôlé que cette perturbation est négligeable, en réalisant une électrode de test dont une partie n'était pas subdivisée en plaques minces, (par comparaison des résultats obtenus sur chaque partie de l'électrode). De plus, elle sera rapidement atténuée par une usure préférentielle le long de ces lignes de discontinuités dès les premières décharges.

La résolution spatiale de ce système de mesures est limitée par

le diamètre des taches anodique et cathodique. Ce diamètre est fonction de l'énergie dissipée dans la décharge. Le tableau ci-dessous nous donne un ordre de grandeur du diamètre des cratères érodés par les décharges.

énergie par décharge (Joule)	$2 \cdot 10^{-5}$	10^{-2}	$5 \cdot 10^{-1}$
diamètre moyen des cratères (mm)	<0.1	0.3	1

Compte tenu de ces dimensions, nous avons opté pour une résolution, donc une épaisseur de plaque de 0,5mm. Expérimentalement, nous avons sélectionné l'isolant séparant les plaques. Les résultats les plus satisfaisants ont été réalisés avec des feuilles de mica de 0,03 mm d'épaisseur. Ces dernières résistent bien à la proximité de décharges et évitent la formation de court-circuits entre les plaques. Par ailleurs, elles ne sont pas trop résistantes et s'usent en fonction de l'usure des électrodes.

Nous avons limité la surface active de l'électrode à un carré de 3 cm de côtés. Chaque électrode est donc constituée par un assemblage de 60 plaques de 0,5 mm d'épaisseur. (fig. 3.2.1.1)

Exemple: Une décharge qui éclate entre le 17ème plaque anodique et la 44ème plaque de la cathode aura pour coordonnées:

$$\text{Anode : } X = 17 \times 0,5 \text{ mm} = 8,5 \text{ mm}$$

$$\text{Cathode: } Y = 44 \times 0,5 \text{ mm} = 22 \text{ mm}$$

ou, plus précisément, l'emplacement de claquage (X;Y) sera en mm: (8,25 $\pm$ 0,25 ; 21,75 $\pm$ 0,25)

3.2.1.2 Système de détection: Il nous reste à détecter la plaque à travers laquelle circule le courant d'arc.

On pourrait le faire en insérant en série avec chaque plaque une résistance "R" et en mesurant la chute de tension

" $R \cdot I_{\text{arc}}$ " aux bornes de ces dernières. Seule, la plaque traversée par le courant donnerait un signal non nul. Ce système simple n'est pas judicieux pour plusieurs raisons:

- Le signal est fonction du courant d'arc.
- Il serait nécessairement petit mais serait superposé à la tension appliquée donc difficile à mesurer.
- La plaque détectée est entourée de plaques à un potentiel plus élevé (de $R \cdot I_{\text{arc}}$). Il en découle un risque de déplacement du point d'attache de l'arc sur les électrodes. Nous devons éviter cette instabilité à tout prix, puisque nous voulons justement relever la position de l'arc.

Par ces motifs, nous avons détecté le courant d'arc en "entourant chaque plaque" d'un tore ferromagnétique que le courant traverse. On détecte alors la tension induite dans un fil de lecture qui entoure la ferrite. (c.f. fig. 3.2.1.2, 3.2.1.3 et 3.2.1.4)

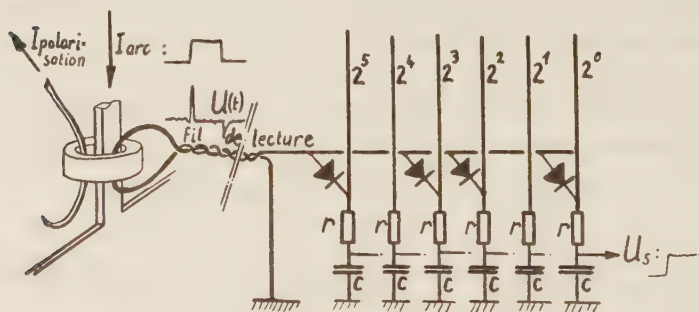


fig. 3.2.1.3 Plaque no 45 avec décodage et intégration du signal lu par le fil de lecture.

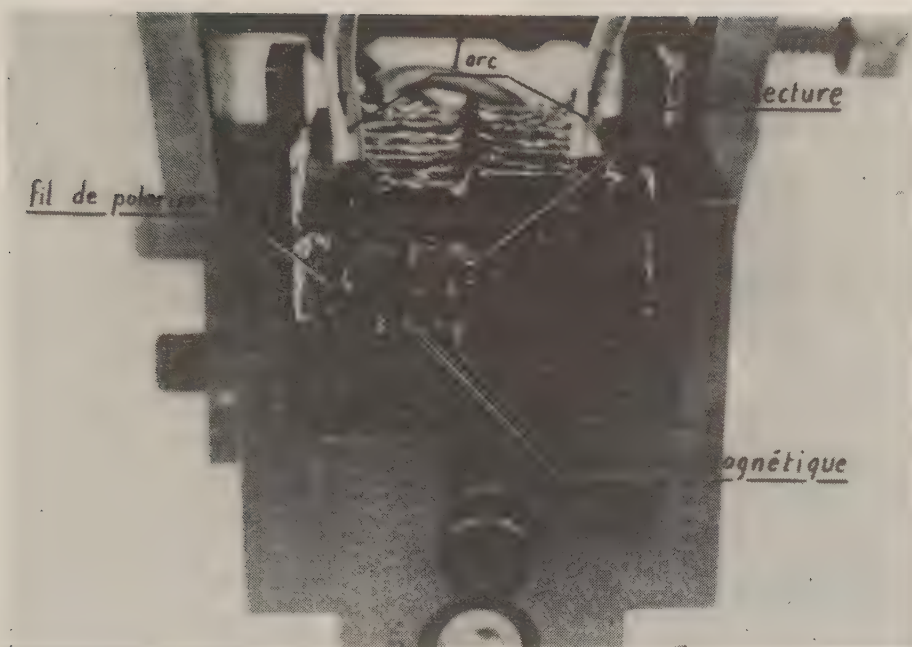


fig. 3.2.1.4 Dispositif de lecture d'une des électrodes. Chaque ferrite est traversée par le fil de polarisation et un fil de lecture.

L'amplitude $U(t)$ du signal détecté par une plaque est donnée par la relation:

$$|U(t)| \sim N \frac{d\phi}{dt} =$$

$$= NS \frac{d}{dt} (\mu H) =$$

$$= \frac{NS}{2\pi r} \frac{d}{dt} (\mu I_{\text{arc}})$$

N = nombre de spires du fil de lecture

ϕ = flux dans la ferrite

S = section de la ferrite

$\mu = \mu_0 \mu_r$ = perméabilité magnétique du tore

H = champ magnétique créé par le courant d'arc

r = rayon moyen de la ferrite

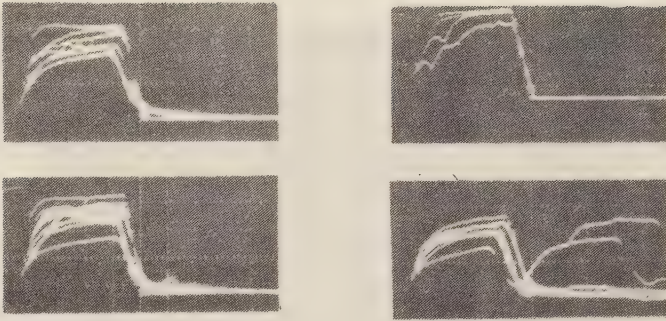


fig. 3.2.1.5 Courant d'arc I_{arc} pour plusieurs décharges consécutives. On remarque que le temps de montée du courant est assez mal défini.

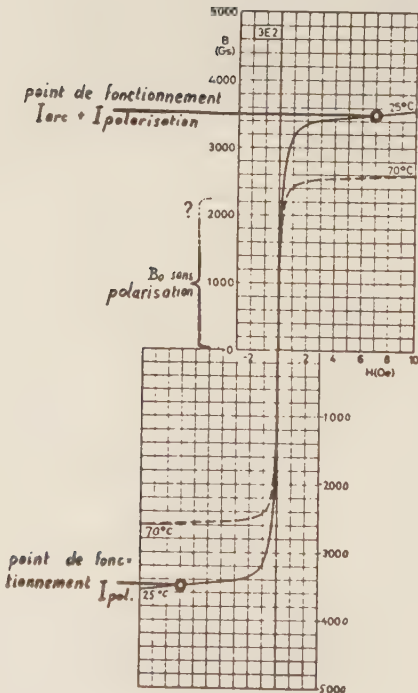
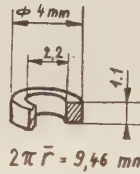


fig. 3.2.1.6 Courbe d'hystérèse des tores ferromagnétiques utilisés: ferrites "PHILIPS" no 4322 020 36651 en 3E2.



Nous verrons par la suite (para. 3.3) que notre générateur délivre des impulsions de courant I_{arc} rectangulaires, ajustables. Le temps de montée du courant d'arc varie fortement d'une décharge à l'autre. (fig. 3.2.1.5). La perméabilité magnétique relative μ_r également: elle passe de la perméabilité initiale ($\mu_r (H=0)$) à la perméabilité de saturation qui est beaucoup plus petite lorsque l'arc est établi (fig. 3.2.1.6). Le terme $\frac{d}{dt} (\mu \cdot I_{arc})$ est donc très mal défini.

Pour éviter ces inconvénients, nous allons intégrer le signal $U(t)$ jusqu'à ce que le courant d'arc se soit stabilisé.

$$\int_0^T |U(t)| dt = \int_0^T N \cdot S \frac{dB}{dt} dt = NS (B_{\text{sat}}(T, I_{\text{arc}}) - B_0(T, I_{\text{arc}}))$$

Le signal intégré a donc l'avantage d'être plus reproductible. Par ailleurs, il ne dépend que très peu du courant maximum de l'arc puisque la ferrite est totalement saturée. La forte perméabilité initiale de la ferrite a pour fâcheuse conséquence que l'induction rémanente B_r est mal définie, car elle est fonction du taux de répétition des décharges et fortement sensible à un champ magnétique parasite (par exemple un claquage sur une plaque voisine). Nous avons remédié à ce défaut en saturant le tore ferromagnétique au repos avec un courant de l'ordre de $-\frac{1}{2} I_{\text{arc}}$. L'amplitude U_s du signal intégré à l'aide d'un "RC" sera approximativement:

$$U_s = \frac{1}{RC} \int_0^T |U(t)| dt \approx 2 \frac{NS}{RC} B_{\text{sat}}(T, I_{\text{arc}}) \quad 3.2.1.7$$

Le couplage entre les ferrites, induit par le courant de polarisation qui les traverse toutes, peut être rendu arbitrairement petit si le circuit de polarisation est suffisamment inductif.

Notre signal n'est donc finalement que fonction de l'induction de saturation, qui, elle même, dépend du courant d'arc et de la température. Sur la courbe d'hystérèse (fig. 3.2.1.6), on voit qu'un changement d'un facteur 5 du courant d'arc ne modifie que de 5% l'induction de saturation, ce qui est largement négligeable par rapport à l'effet de température que nous allons brièvement décrire: la puissance fournie à une ferrite est proportionnelle au produit de sa fréquence de commutation par l'énergie fournie par commutation. Cette dernière est donnée par la surface du cycle d'hystérèse du tore qui, dans notre cas, est très petite. La température de la ferrite ne

sera constante que si le milieu qui l'entoure est capable d'évacuer l'énergie dissipée par ces commutations successives. Ce bilan énergétique est toujours respecté pour des fréquences de décharges faibles: typiquement quelques KHz. Pour des fréquences plus élevées, la température des ferrites est fonction de la distribution spatiotemporelle des décharges dans le gap. Un exemple illustrera bien cette dépendance: une succession momentanée de décharges localisées en un point de coordonnées "X,Y" constantes ne sollicitera que 2 ferrites (une par électrode). Leur fréquence de commutation sera identique à la fréquence des décharges. Par opposition, pour des décharges réparties sur toute la surface de l'électrode, la fréquence de commutation des tores sera réduite dans le rapport du nombre total de plaques par électrode. La température des ferrites sera donc très différente pour ces deux types de répartition spatiale de décharges.

Pratiquement, lors des mesures, les électrodes étaient complètement immergées dans le diélectrique, ce qui assurait un refroidissement suffisant des tores. Dans le cas de mesures avec des taux de répétition des décharges élevés, une circulation forcée du diélectrique liquide autour des ferrites améliorerait l'évacuation de la chaleur dissipée par les tores.

La formule 3.2.1.7 nous donne pour U_s :

$N = 1 \text{ spire}$	}	$U_s (25^{\circ}C) = 0,46 \text{ V}$
$S = 1,1 \cdot 0,9 \approx 1 \text{ mm}^2$		
$R \cdot C \approx 1,5 \text{ } \mu\text{s}$		
$I_{\text{arc}} \approx 10 \text{ A}$		
$I_{\text{polarisation}} \approx 5 \text{ A}$		
$B_{\text{sat}} (25^{\circ}) \approx 3500 \text{ Gauss}$	} fig. 3.2.1.6	$U_s (70^{\circ}C) = 0,35 \text{ V}$
$B_{\text{sat}} (70^{\circ}) \approx 2600 \text{ Gauss}$		

On remarque sur la figure 3.2.1.8 que les valeurs calculées précédemment pour U_s sont bien vérifiées. De plus, il est simple d'ajuster le seuil de discrimination entre l'état "1" de U_s (obtenu pour $I_{\text{arc}} + I_{\text{polarisation}}$) et l'état "0" de U_s (défini par $I_{\text{polarisation}}$) et ce, malgré le bruit et l'effet de température, car ces deux niveaux restent bien distincts.

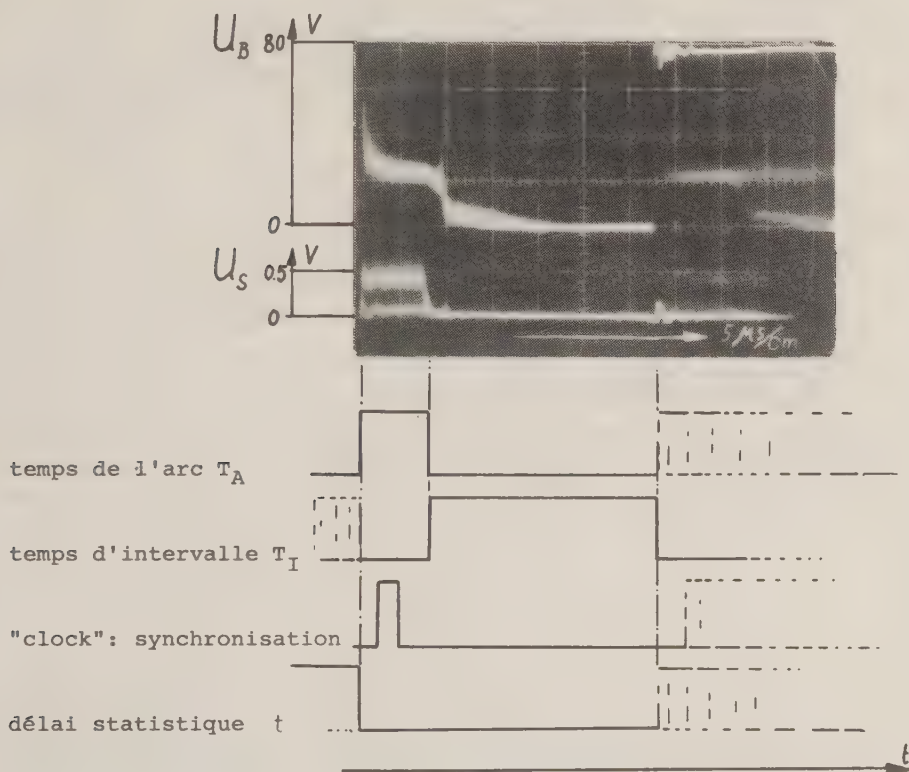


fig. 3.2.1.8 Tension appliquée entre les électrodes (trace du haut) et signal U_s correspondant (trace du bas). La photographie a été relevée à un taux de répétition moyen des décharges d'environ 30 KHz. Le courant d'arc était de 16 (A). On voit qu'il est aisé de discriminer le signal U_s entre l'état "1" ($I_{\text{arc}} + I_{\text{polarisation}}$) et l'état "0" $I_{\text{polarisation}}$, malgré le bruit et l'effet de température.

3.2.1.3 Electronique des électrodes XY Cette électronique doit coder, mettre en forme, mémoriser temporairement et remettre à zéro les couples de coordonnées "X,Y" successifs transmis par les ferrites des électrodes (c.f. fig. 3.2.1.9)

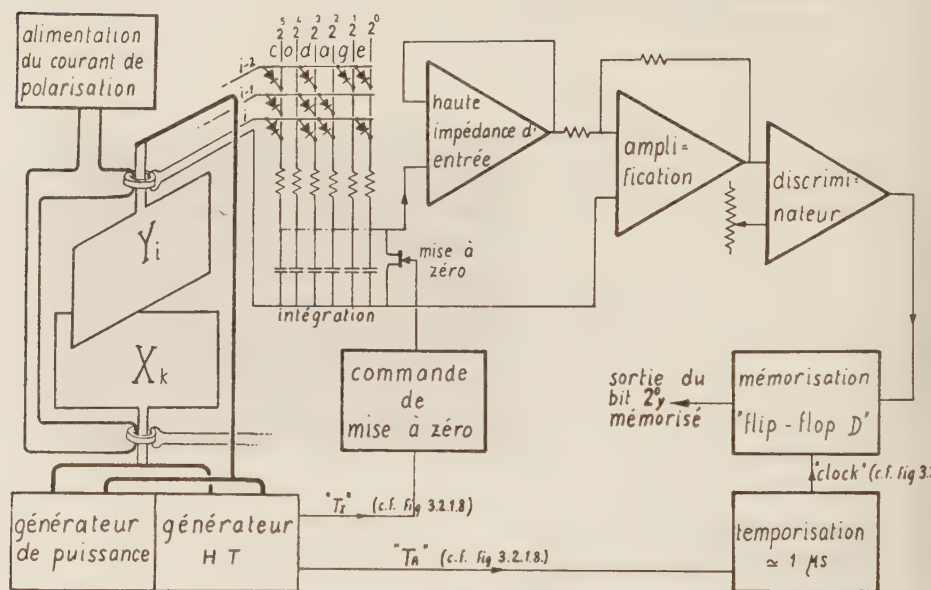


fig. 3.2.1.9 Schéma bloc de l'interface "électrode XY"-électronique

Il y a, par électrode, 60 plaques, ce qui peut être représenté en code binaire par 6 bits. ($2^6 = 64$). Un mot d'ordinateur de 16 bits suffit donc pour mémoriser les 6 bits_X et les 6 bits_Y représentant l'emplacement d'une décharge.

Le codage a été réalisé simplement par une matrice à diodes qui précède les intégrateurs, ce qui en limite considérablement le nombre (12 au lieu de 120).

D'autre part, la tension de seuil des diodes coupe le bruit éventuel que transmettent les ferrites. L'intégration se fait par un circuit RC (fig. 3.2.1.3). La remise à zéro de tous les signaux se réalise en court-circuitant les 12 condensateurs d'intégration durant le temps d'intervalle T_I séparant 2 décharges consécutives avec 12 transistors à effet de champ. (c.f. fig. 3.2.1.9). Une remise à zéro par codage du pic négatif du signal, provoqué par l'interruption du courant d'arc, est théoriquement possible, mais ce procédé n'est pas à l'abri des dérives découlant de l'assymétrie du signal (entre enclenchement et déclenchement); d'autre part, le signal est alors limité à la tension de seuil des diodes.

Il nous reste à mettre en forme et mémoriser les 12 signaux: chaque intégrateur est suivi d'un amplificateur à haute impédance d'entrée, puis, d'un discriminateur TTL. Le niveau de discrimination est ajusté en fonctionnement en jouant sur le niveau "0" de l'amplification différentielle. La mémorisation des 2 x 6 digits discriminés s'effectue à l'aide de 12 mémoires Flip-Flop D: l'impulsion de synchronisation pour la mémorisation ("clock") est générée, en retardant d'environ une micro-seconde le signal T_A indiquant l'amorçage, par un monostable. Ce délai est plus grand que le plus long des temps de montée du courant d'arc I_{arc} , on est donc sûr que le signal a atteint sa valeur asymptotique.

Après chaque décharge, il se présente donc, à la sortie de "l'interface électrode XY-électronique" 2 x 6 = 12 signaux binaires mémorisés définissant de manière univoque son emplacement de claquage en coordonnées rectangulaires, d'unité de longueur 0,5 mm (épaisseur des plaques).

Notons que la mise à zéro des intégrateurs n'efface pas l'information mémorisée à la sortie de cet interface. Il faut une nouvelle décharge pour que l'adresse affichée soit modifiée, ce qui donne à l'ordinateur un délai maximum pour venir lire les coordonnées de la décharge.

3.2.2 ELECTRODES CONCENTRIQUES

D'une manière générale, en électroérosion, on ne contrôle ni ne maîtrise les positions successives des décharges érosives, de même avec les électrodes "X-Y" nous n'influons pas directement les emplacements des arcs, nous nous contentons de relever leur position. Ce n'est plus le cas avec les électrodes concentriques: on désire mettre en évidence qu'à proximité d'arcs, la tension de claquage respectivement le délai statistique est diminué. Nous devons donc être capables d'amorcer une décharge à une distance imposée et ajustable "r" d'arcs répétitifs.

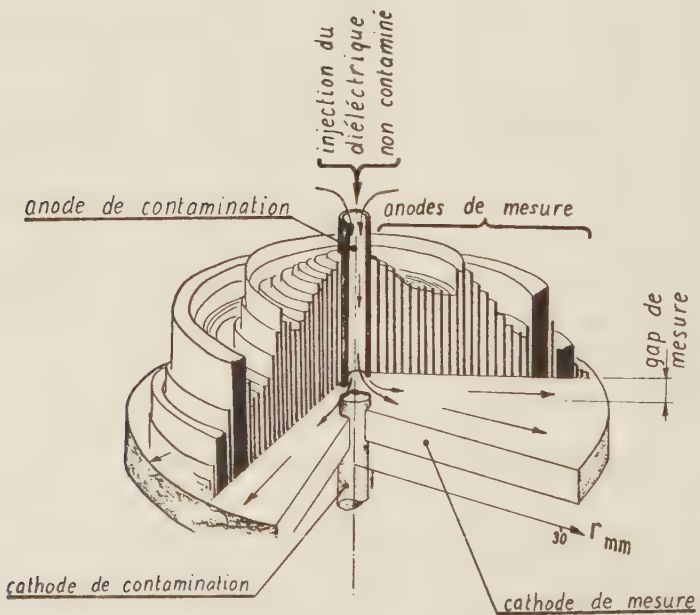


fig. 3.2.2.1 Vue éclatée d'une électrode concentrique. Le couple d'électrodes de contamination, au centre, est électriquement et mécaniquement indépendant des électrodes de mesures.

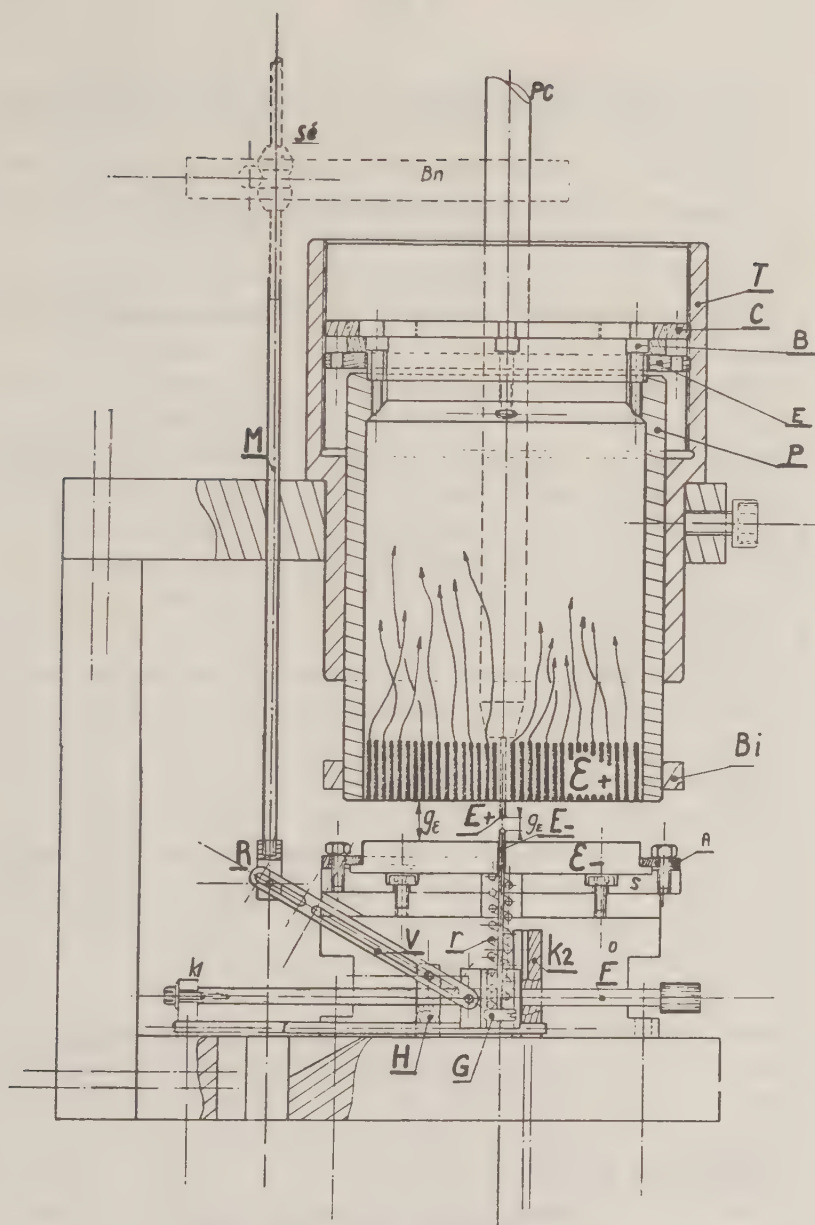


fig. 3.2.2.2 Dessin d'ensemble des électrodes concentriques: l'anode de contamination E^+ est soudée sur le porte capillaire PC, la cathode de contamination est bloquée dans la bague G, elle coulisse verticalement le long de la glissière de K_2 en comprimant le ressort x . La position du gap de contamination g_E est assurée de manière à toujours rester centrée au milieu du gap de mesure g_E : PC descend pour compenser l'usure de E^+ , ce mouvement fait simultanément remonter E_- par l'intermédiaire du levier V et des barres M et Bn. L'assymétrie de l'usure des électrodes de contamination peut être ajustée en déplaçant horizontalement le centre de rotation H du levier V à l'aide de la tige filetée P. Le gap de mesure g_E est ajusté en déplaçant les électrodes de mesures c_+ par rapport à la cathode c_- à l'aide du filetage micrométrique du tube T, qui fait coulisser la porte électrodes E et C. Un capteur inductif nous permet de connaître avec grande précision la valeur de g_E .

3.2.2.1 Corps de l'électrode avec son support: contrairement aux électrodes "X-Y" la fonction "contamination du diélectrique" est maintenant indépendante de la fonction "mesure des paramètres de claquage". Pour ce type d'acquisition de données, nous avons deux couples d'électrodes distincts: dans le gap du premier, on altère les propriétés physique et chimique du diélectrique par électroérosion, ce diélectrique plus ou moins contaminé est alors injecté dans le gap du second où l'on relève les paramètres caractéristiques des décharges en fonction des modifications apportées au diélectrique. Ces couples d'électrodes ont été réalisés dans une géométrie à symétrie cylindrique, schématisé par la figure 3.2.2.1. La paire d'électrodes de conditionnement du diélectrique, au centre, sur l'axe du cylindre, est électriquement et mécaniquement indépendante des électrodes de mesure qui l'entourent. C'est un tube fin dans lequel on injecte le diélectrique. Ce capillaire, anode, s'use par électroérosion sur la cathode de contamination qui lui fait face. Cette usure asymétrique des électrodes de contamination est compensée par un dispositif mécanique qui les déplace, de manière à ce que les décharges de conditionnement du diélectrique éclatent à la hauteur du gap de mesure. (fig. 3.2.2.2.). Le diélectrique ainsi contaminé s'échappe à travers le gap des électrodes de mesure où il est testé par des décharges très peu énergétiques afin de réduire au minimum les modifications apportées à ce dernier.

Chaque électrode de mesure est en réalité un assemblage d'électrodes élémentaires, cylindres concentriques, isolés les uns des autres par une résine epoxy. Le diélectrique contaminé au centre s'échappe vers l'extérieur en passant successivement devant chaque électrode élémentaire i (fig. 3.2.2.3 et 3.2.2.4) L'intervalle de temps Δt_i nécessaire au diélectrique pour passer du lieu de contamination de rayon r_0 à l' $i^{\text{ème}}$ électrode élémentaire de mesure de rayon r_i , est fonction du débit D du diélectrique, du gap de mesure g et du rayon moyen $\overline{r_i}$ de l'électrode i . En postulant que le diélectrique est incompressible, ce qui est une très mauvaise approximation, car cette

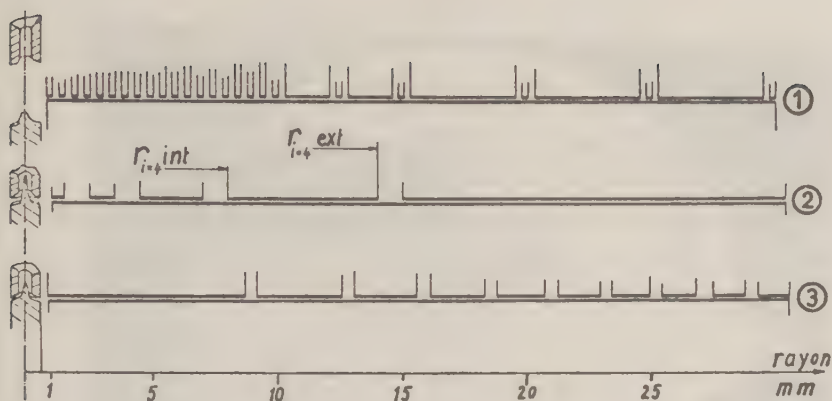


fig. 3.2.2.3 Divers assemblages d'électrodes de mesures, avec autour de l'axe du cylindre, à gauche de la figure, le couple d'électrodes de contamination. Ce dernier porte le numéro d'ordre "0" dans le tableau récapitulatif des assemblages d'électrodes concentriques de mesures.

numéro d'ordre "i"	rayon intérieur: r_{int} (mm)	rayon extérieur: r_{ext} (mm)	rayon moyen: r_i (mm)	surface (mm ²)
1 ASSEMBLAGE D'ELECTRODES A GRANDE RESOLUTION				
0	0.25	0.6	0.425	.9346
1	0.85	1.1	0.975	1.532
2	1.35	1.6	1.475	2.317
3	1.85	2.1	1.975	3.102
4	2.35	2.6	2.475	3.888
5	2.85	3.1	2.975	4.673
6	3.35	3.6	3.475	5.458
7	3.85	4.1	3.975	6.244
8	4.35	4.6	4.475	7.029
9	4.85	5.1	4.975	7.815
10	5.35	5.6	5.475	8.600
11	5.85	6.1	5.975	9.385
12	6.35	6.6	6.475	10.17
13	6.85	7.1	6.975	10.96
14	7.35	7.6	7.475	11.74
15	7.85	8.1	7.975	12.53
16	8.35	8.6	8.475	13.31
17	8.85	9.1	8.975	14.10
18	9.35	9.6	9.475	14.88
19	9.85	10.1	9.975	15.67
20	10.35	12.1	11.225	123.4
21	12.35	12.6	12.475	19.60
22	12.85	14.6	13.725	150.9
23	14.85	15.1	14.975	23.52
24	15.35	19.6	17.475	466.6
25	19.85	20.1	19.975	31.38
26	20.35	24.6	22.475	600.2
27	24.85	25.1	24.975	39.23
28	25.35	29.6	27.475	733.7
29	29.85	30.1	29.975	47.08
2 ASSEMBLAGE D'ELECTRODES A SURFACES VARIABLES				
0	0.25	0.6	0.425	.9346
1	1.	1.5	1.25	3.927
2	2.5	3.5	3.	18.85
3	4.5	7.	5.75	90.32
4	8.	14.	11.	414.7
5	15.	30.5	22.75	2216.
3 ASSEMBLAGE D'ELECTRODES A SURFACES CONSTANTES				
0	0.25	0.6	0.425	.9346
1	0.8	8.65	4.725	233.0
2	9.15	12.55	10.85	231.8
3	13.05	15.65	14.35	234.4
4	16.15	18.3	17.225	232.7
5	18.8	20.7	19.75	235.8
6	21.2	22.9	22.05	235.5
7	23.4	24.95	24.175	235.4
8	25.45	26.875	26.1625	234.2
9	27.5	28.825	28.1625	234.4
10	29.35	30.6	29.975	235.4

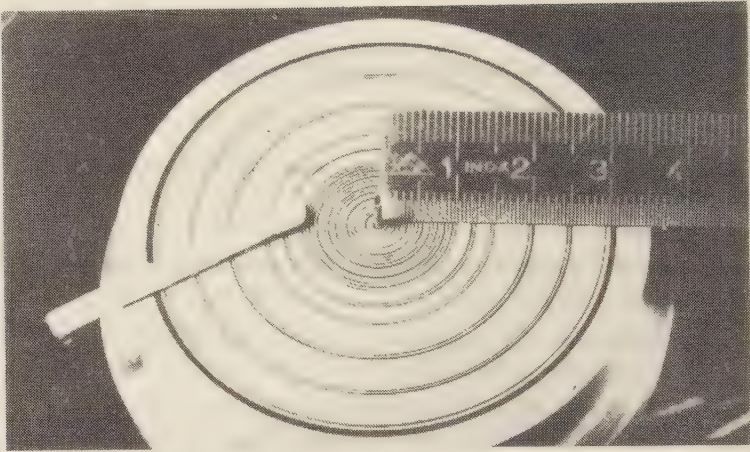


fig 3.2.2.4 Electrode concentrique à grande résolution: les parties en cuivre sont blanches sur la photographie, la résine époxy qui les isole les unes des autres est noire. Au centre, le capillaire, électrode de contamination, dépasse.

hypothèse revient à ignorer le dégagement gazeux des décharges de contamination qui n'est certainement pas négligeable, on trouve pour Δt_i :

$$\Delta t_i = r_0 \int_{r_0}^{\overline{r_i}} \frac{dr}{v(r)}$$

où $v(r)$ est la vitesse du diélectrique moyennée sur la largeur du gap, équivalente à la vitesse d'un liquide non visqueux.

Compte tenu de l'équation de continuité dans notre géométrie à symétrie cylindrique:

$$\Delta t_i = r_0 \int_{r_0}^{\overline{r_i}} \frac{2\pi r g dr}{D} = \frac{\pi g}{D} (\overline{r_i}^2 - r_0^2) \approx \frac{\pi g}{D} \overline{r_i}^2 \quad (3.2.2.5)$$

Pratiquement, le liquide étant visqueux, la vitesse $v(r)$ du diélectrique sera également fonction de la coordonnée cylindrique "z": on aura $v=v(r,z)$, avec comme conditions aux limites une vitesse nulle sur les électrodes c'est-à-dire:

$v(r, -g/2) = v(r, +g/2) = 0$. De cette remarque il découle que les intervalles de temps Δt ne sont pas seulement fonction

du rayon de l'électrode r mais également de la coordonnée z on aura donc de même $\Delta t = \Delta t(r,z)$. Cette influence est particulièrement marquée pour des écoulements laminaires car elle est cumulative le long des lignes de courant du fluide, ce qui a pour conséquence immédiate, que plus les rayons de mesure seront grands, plus la dispersion de l'évaluation de Δt sera grande.

Nous pouvons donc avec les électrodes concentriques, non seulement montrer que l'amorçage est éventuellement facilité au voisinage d'arcs récurrents mais également mettre en évidence une hypothétique dépendance temporelle de cette facilité d'amorçage. Cette constante de temps pourrait nous permettre d'identifier l'"agent" ou le "phénomène" créé par les arcs et qui diminue la tension de claquage, respectivement le délai statistique d'amorçage.

3.2.2.2 Interface "électrode concentrique-électronique"

Cet interface doit connecter successivement les différentes électrodes élémentaires à la source de tension de claquage. Nous avons confié au programme de l'ordinateur (software) la commande du choix, de la durée et de la succession des diverses connections de même que l'enclenchement de la tension de claquage de chaque décharge. Cette solution s'est avérée très souple lors des mesures, elle a simplifié la construction de l'interface. Ce dernier est constitué d'une mémoire tampon qui enregistre les ordres de l'ordinateur, suivie d'un décodage qui les interprète et les transmet soit au générateur via le pilote pour enclencher la tension de claquage, soit aux relais pour en connecter un autre à la source de tension. (fig 3.2.2.6)

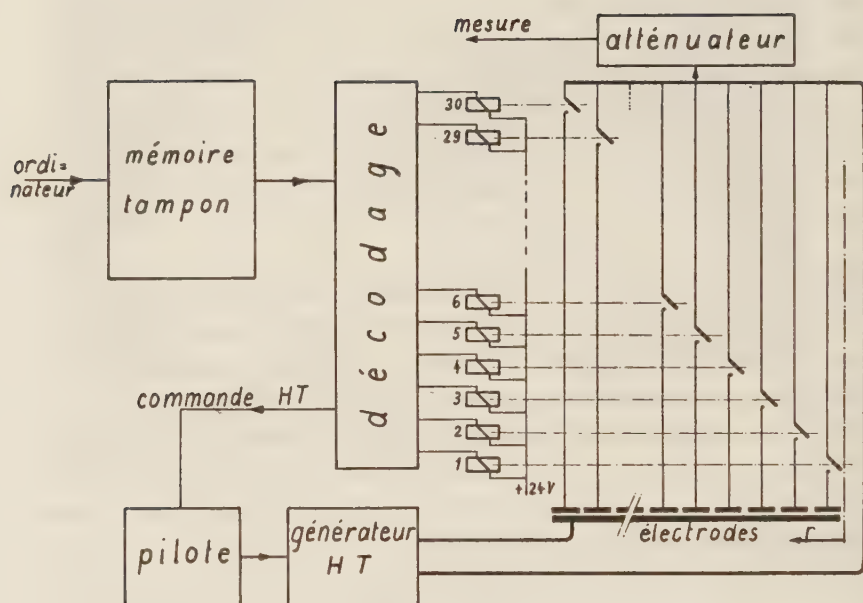


fig. 3.2.2.6 Schéma bloc de l'interface électrodes concentrique-électronique: les contacts des relais "reed" sont ouverts au repos.

Nous avons utilisé des relais reed "HAMLIN high voltage" du type DRVT-5 afin de pouvoir mesurer soit des délais statistiques soit des tensions de claquage jusqu'à 5KV. Notons que les relais ne sont que très peu sollicités puisque toutes les commutations se font à vide. L'utilisation de relais diminue la fréquence maximum d'acquisition des données, car leur temps de commutation est relativement lent: $< 2\text{ms}$, y compris les rebonds, mais présente l'avantage d'une perturbation négligeable du circuit haute-tension.

3.2.3 ELECTRODE CYLINDRIQUE C'est un couple d'électrodes à champ $\vec{E}$ homogène dans une géométrie annulaire. Cette

électrode, développée par Monsieur Frei { 4 } a une géométrie co-axiale particulière-ment soignée. Elle convient donc très bien à des mesures de délais statistiques courts. (fig 3.2.3.1) Cette électrode cy-lindrique massive ne nécessite pas d'inter-face pour la relier à l'électronique générale de mesure car elle ne permet pas d'influ-encer ou de mesurer la position spatiale des décharges.

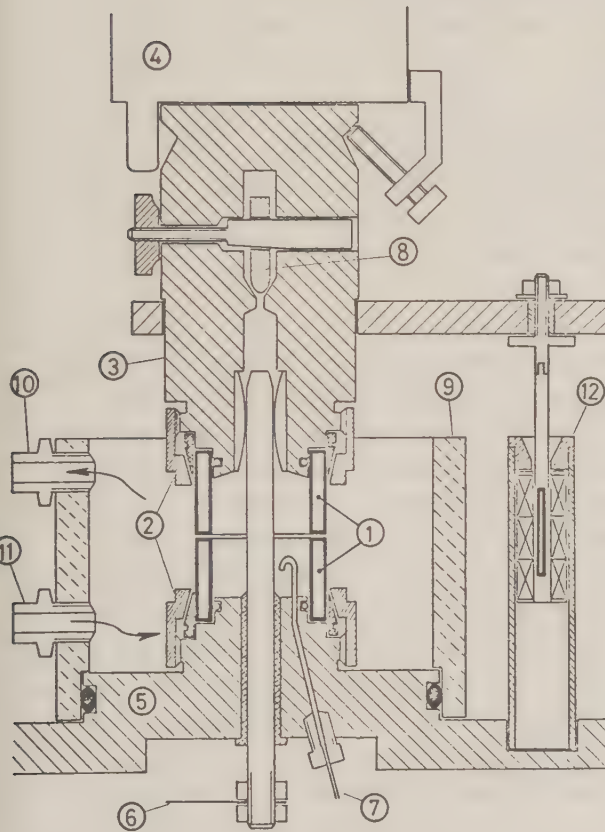


fig. 3.2.3.1 Electrode cylindrique montée sur son support:
1) couple d'électrodes diamètre intérieur diamètre extérieur
2) bagues de serrage conique. 3) support de l'électrode supé-rieure mobile. 4) tête du servomécanisme de déplacement ver-tical de l'électrode. 5) table de fixation de l'électrode in-férieure immobile, reliée à la masse. 6) connecteur électrique de l'électrode supérieure. 7) capillaire pour l'injection du diélectrique. 8) échappement de l'air. 9) récipient pour re-cueillir le diélectrique. 10) "trop plein". 11) injection de diélectrique. 12) transformateur différentiel de mesure du gap.

3.2.4 ELECTRODE P-V L'électrode P-V (Pression-Vitesse)

permet de faire des mesures de délais statistiques ou de tensions de claquages en fonction de deux paramètres physiques jusque là ignorés, à savoir:

- LA PRESSION : le milieu diélectrique dans lequel éclatent les décharges peut être mis sous pression: de 0 à environ 20 bars.

- LA VITESSE : la surface de l'anode peut se déplacer par rapport à celle de la cathode par un mouvement rotatif de vitesse tangentielle constante, ajustable entre 0 et environ 20 cm/s. Ce mouvement relatif des électrodes se répercute sur le diélectrique visqueux.

Il est évident que l'injection d'un diélectrique entre les surfaces de deux électrodes est un procédé simple de modifier les paramètres pression et vitesse . Toutefois, ces deux paramètres n'auront en général pas une valeur bien déterminée par ce procédé. En effet, la pression du diélectrique prend toutes les valeurs entre la pression à l'entrée de l'électrode (pression d'injection) et la pression atmosphérique pour un échappement libre de ce dernier. Il en est de même pour la vitesse du diélectrique car la section du canal d'écoulement n'est généralement pas constante (typiquement:écoulement radial) la vitesse du diélectrique doit donc être variable pour satisfaire l'équation de continuité. De plus, une simple injection du diélectrique ne permet évidemment pas d'agir sur un seul des deux paramètres car ils sont étroitement interdépendants. Remarquons que la répartition des vitesses dans le gap sera différente dans le cas d'une injection par rapport au cas du déplacement relatif des électrodes.

3.2.4.1 Electrode P-V cylindrique La première électrode P-V développée a une géométrie cylindrique (fig 3.2.4.1). L'électrode centrale est montée sur une broche tournante CHARMILLES type AC-3 à vitesse de rotation " ω " ajustable entre 0 et environ 1,5 tour/seconde. Le champ électrique $\vec{E}$

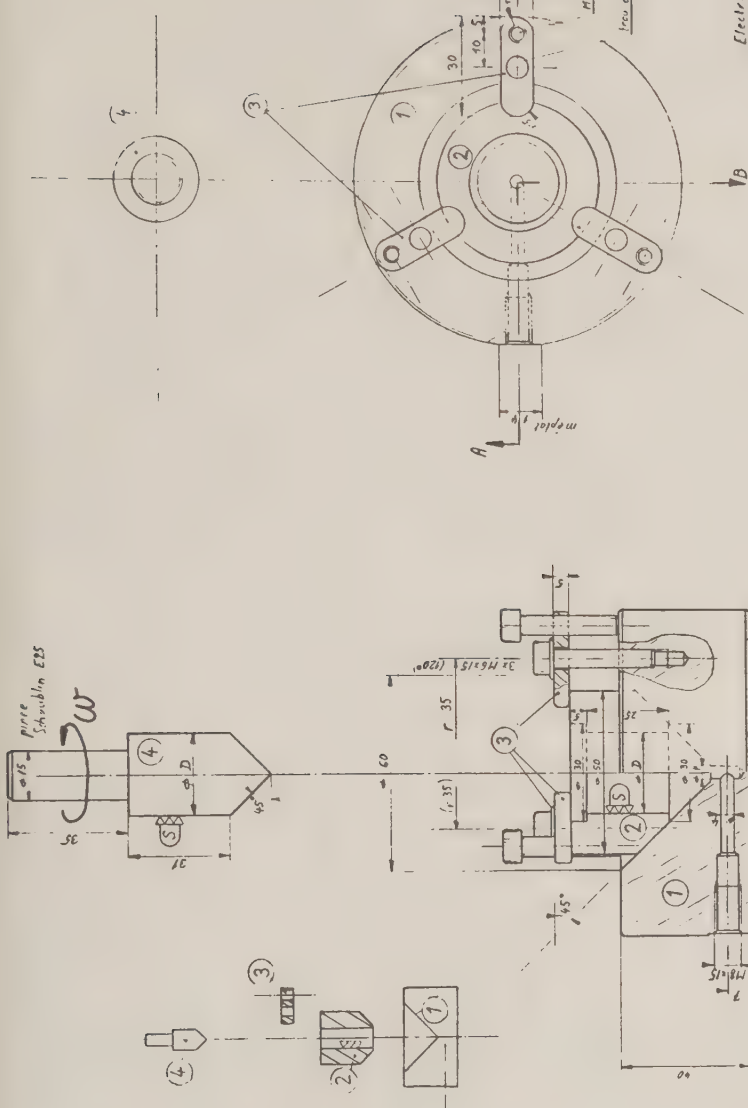


fig 3.2.4.1 Electrode vitesse-pression cylindrique: 1) support de centrage, 2) électrode fixe, 3) brides de serrage, 4) électrode tournante. Les décharges éclatent entre les parois rectifiées S des pièces 2 et 4. Un couvercle étanche peut être bridé sur l'électrode 2 si l'on désire faire des mesures sous pression; il n'est pas représenté sur la figure.

Electrodes vitesse-pression I

Lois des diélectriques

22. 3. 77

Bismette

est pratiquement homogène dans le gap qui sépare le cylindre mobile du cylindre fixe coaxial qui l'entoure, car le rayon r de l'électrode mobile est beaucoup plus grand que le gap entre les deux électrodes. La vitesse tangentielle v de l'électrode mobile par rapport à l'électrode fixe est donnée par $v = \omega r$. Pour modifier la pression dans le gap, on ferme avec un couvercle étanche bridé sur l'électrode fixe, l'échappement du diélectrique et l'on ajuste la pression d'injection de ce dernier. Le gap est augmenté en changeant l'électrode mobile de rayon r par une électrode de rayon $r - \Delta r$; cette manipulation est fastidieuse car le centrage de l'électrode mobile doit être fait avec une précision de l'ordre du micron, très difficile à obtenir et à conserver malgré les cônes qui équipent toutes les pièces concentriques. Nous avons donc, pour pouvoir modifier le champ électrique en gardant la tension de claquage constante, rectifié plusieurs électrodes mobiles dont les cotes finales et les gaps correspondants sont donnés dans le tableau ci-dessous: (le diamètre D de l'électrode fixe no. 2 de la fig 3.2.4.1 est de $25 \pm_{0,001}^{+0,001}$ mm.)

Electrodes no 4 de la fig 3.2.4.1		
No de l'électrode	ϕD (mm)	gap correspondant (microns)
4.1	25 - 0,040	20
4.2	25 - 0,054	27
4.3	25 - 0,074	37
4.4	25 - 0,102	51
4.5	25 - 0,122	61
4.6	25 - 0,154	77

Une erreur de centrage ou de parallélisme de l'axe de l'électrode mobile par rapport à celui de l'électrode fixe donne lieu à des délais statistiques très différents en fonction de la position angulaire de l'électrode mobile. Les plus petits défauts de positionnement sont donc très facilement décelés en faisant tourner l'électrode mobile tout en remettant sous tension les électrodes après chaque claquage: la fréquence moyenne des amorçages est modulée périodiquement, cette modulation est en phase avec la rotation de l'électrode, elle est directement audible ou facile à détecter avec un oscilloscope.

La difficulté majeure rencontrée pour superposer l'axe de l'électrode fixe avec l'axe de l'électrode mobile nous a contraints à développer une nouvelle électrode P-V:

3.2.4.2 Electrode P-V conique. Cette électrode est semblable à la précédente: la partie mobile est à nouveau montée sur une broche tournante, on peut également admettre que le champ électrique est homogène dans le gap conique (fig 3.2.4.2). Cette conicité de l'électrode mobile entraîne évidemment un étalement de la vitesse tangentielle puisque le rayon de l'électrode passe de 30 mm à environ 24,2 mm le long de son axe. La vitesse tangentielle v sera donnée par

$$v = \omega \bar{r} \pm \omega \Delta r \quad \text{avec par construction} \quad \bar{r} = 27,11 \text{ mm} \\ \text{(c.f fig 3.2.4.2)} \quad \Delta r = 2,89$$

Pratiquement v est défini à 10% près, ce qui est supportable en regard des avantages que présente une géométrie conique à savoir:

- Le gap est ajusté par un déplacement vertical de l'électrode mobile. Ce déplacement est facile à faire car la broche tournante qui supporte l'électrode mobile est montée sur la tête d'une machine à électroérosion dont le déplacement vertical est asservi. Cela présente l'avantage d'éviter des démontages et les centrages et alignements qui leur succèdent nécessairement dans une géométrie cylindrique. De plus, lors du montage initial, une erreur de centrage ou d'alignement est facilement corrigée par

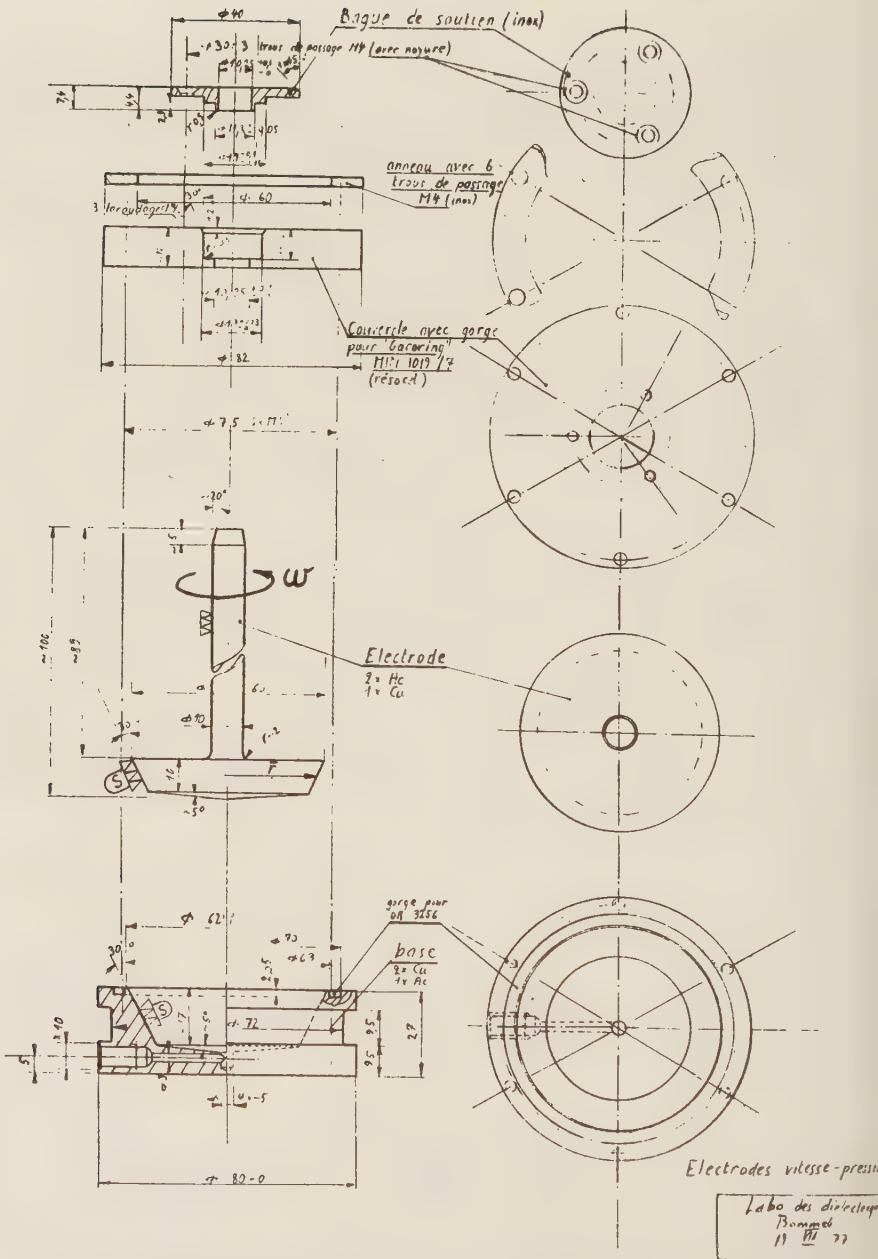


fig 3.2.4.2 Electrode vitesse-pression conique. Les décharges éclatent entre les surfaces rectifiées S respectivement de la base fixe et de l'électrode tournante.

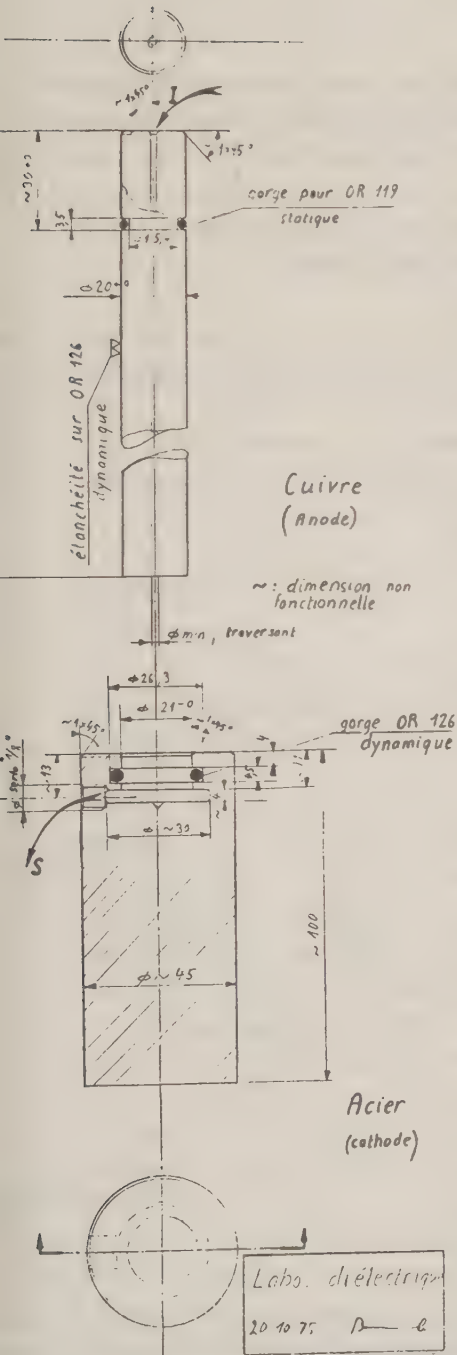


fig 3.2.5.1. Electrodes de conditionnement du diélectrique: il est injecté par le trou central I de l'anode, et est recueilli contaminé par les décharges qui érodent les électrodes à la sortie S de la cathode.

électroérosion avec rotation simultanée de l'électrode mobile.

Les électrodes P-V ne nécessitent aucune électronique spécifique à leur utilisation: il n'y a pas d'interface électrode-électronique.

3.2.5. ELECTRODES AUXILIAIRES Ces électrodes ne servent pas directement à faire des mesures, elles ont une fonction accessoire: préparer c'est-à-dire preconditionner "naturellement" le diélectrique à l'aide duquel nous ferons les mesures. La préparation "naturelle", par opposition à une préparation artificielle, de "synthèse", est une préparation du diélectrique par électroérosion. Connaissant le taux de répétition et les caractéristiques énergétiques des décharges de conditionnement, de même que le débit du diélectrique injecté, on peut quantifier le degré de contamination du diélectrique récupéré à la sortie des électrodes. Les décharges de mesures, très peu énergétiques, ne modifient pratiquement plus le degré de contamination du diélectrique, le milieu de mesure est donc plus reproductible et surtout plus stable et plus homogène dans tout le gap. Ces électrodes peuvent soit être utilisées simultanément avec les mesures, (le diélectrique contaminé est immédiatement injecté dans le gap de mesure)

Le diélectrique injecté est une huile minérale claire comme de l'eau. Après contamination, il ressort des électrodes auxiliaires, un liquide noir comme de l'encre de chine et des fumées. Un litre d'huile contaminée contient typiquement 1 à 2 cm³ de métal érodé, sous forme de petites particules quasiment sphériques, et du graphite provenant du cracking de l'huile.

3.3 CONDITIONNEMENT DES MESURES

Dans ce paragraphe, nous décrivons l'environnement immédiat des électrodes: à savoir la machine à électroérosion CHARMILLES D 10 et ses générateurs, les alimentations supplémentaires pour les décharges, les circuits diélectriques auxiliaires.

3.3.1 ELECTROEROSION: PARTIE MECANIQUE a pour fonction de fixer précisément les électrodes, d'asservir le gap, et d'éventuellement pourvoir à l'apport de diélectrique frais.

3.3.1.1. Support des électrodes. L'une des électrodes (la pièce à usiner en électroérosion) est bridée sur une table à coordonnées. (350 mm x 230 mm). Le déplacement de la table, (au maximum 200 mm x 120 mm) permet le centrage de l'électrode fixe par rapport à l'électrode mobile avec une précision de 0,002 mm lue sur un vernier.

La deuxième électrode (l'outil en électroérosion) est fixée sur la tête de la machine à électroérosion, qui, elle même, est montée sur un chariot qui coulisse verticalement le long de la colonne de la machine.

3.3.1.2. Asservissement du gap. L'électrode fixée sur la tête de la machine peut se déplacer perpendiculairement au plan de la table. Ce mouvement vertical est asservi par un servomécanisme hydraulique. Le signal de commande de la position de la tête est, soit délivré par un circuit interne à la machine,

SCHEMA FONCTIONNEL

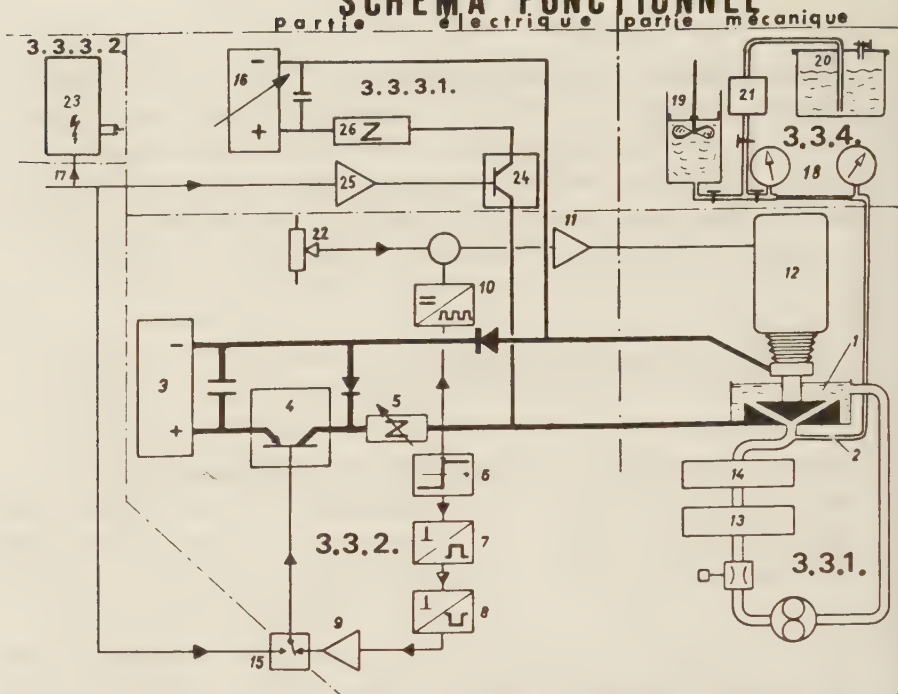


fig 3.3.0.1. Schéma fonctionnel: la numérotation se réfère à l'alinéa du paragraphe 3.3 qui décrit cette partie du schéma fonctionnel.

MACHINE A ELECTROEROSION CHARMILLES

GENERATEUR DE PUISSANCE

- 3 source de tension continue: 80 V
- 4 interrupteur électronique
- 5 impédances variables pour limiter le courant

PILOTE

- 6 circuit détectant le début de chaque décharge
- 7 base de temps fixant la durée des décharges: T_A
- 8 base de temps fixant la durée T_I des interruptions
- 9 amplificateur de l'interrupteur 4

SERVOCOMMANDE DE L'AVANCE DE L'ELECTRODE OUTIL

- 10 filtres
- 11 amplificateurs
- 22 consigne

GENERATEURS AUXILIAIRES

- 23 générateur d'impulsion 4 KV
- REGLAGE DE LA TENSION DE CLAQUAGE U_B
- 15 commutateur pour pilotage externe
- 16 source de tension ajustable 80-270 V
- 17 sortie du pilote externe
- 24 interrupteur électronique
- 25 amplificateur de l'interrupteur
- 26 limitation de courant

ELECTRODES

- 1 électrode outil
- 2 pièce à usiner

ASSERVISSEMENT DU GAP

- 12 servomoteur

CIRCUITS DIELECTRIQUES

- 13 filtres
- 14 thermostat

INJECTION AUXILIAIRE

- 18 mesure du débit
- 19 injecteur de contamination
- 20 injecteur supplémentaire
- 21 filtre millipore

(montage original), soit un signal externe basé sur des critères autres qu'un optimum du rendement de l'usinage (montage additionnel). Ce signal externe nécessite un dispositif de mesure de la position de la tête. (par exemple un capteur inductif). La vitesse maximum de déplacement de la tête est de l'ordre de 2 mm/s, sa fréquence propre de l'ordre de 60 Hz.

3.3.1.3. Circuit diélectrique. Une pompe prélève le diélectrique dans le réservoir (80 l) et l'injecte dans le bac d'usinage, on entre les électrodes, après avoir été filtrées. Cette injection peut être pulsée, éventuellement simultanément avec un retrait de la tête pour faciliter l'évacuation des déchets érodés. Il est également possible d'aspirer le diélectrique au lieu de l'injecter. La température du diélectrique dans la cuve est surveillée par un thermostat qui, le cas échéant, enclanche le circuit d'eau de refroidissement.

3.3.2. ELECTROEROSION: PARTIE ELECTRIQUE. Nous disposons de deux générateurs CHARMILLES respectivement de type isopulse 12 et isopulse 25 tous deux composés d'un pilote et d'un générateur de puissance.

3.3.2.1. Pilote. Il commande séquentiellement le générateur de puissance: après un temps d'intervalle T_I , il l'enclanche, la tension d'amorçage U_B est appliquée et maintenue aux électrodes. Après le délai d'amorçage t , il y a claquage du diélectrique, le pilote détecte cet instant et maintient le courant d'arc durant un temps T_A , après la coupure de l'arc, le cycle recommence par une interruption T_I (fig 3.3.2.1. et 3.2.1.8).

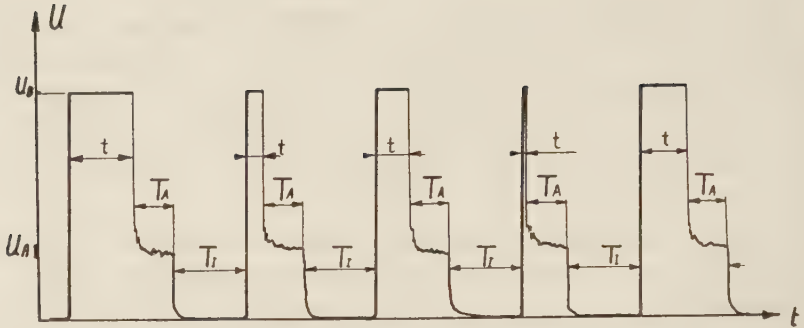


fig 3.3.2.1. Tension U appliquée entre les électrodes en fonction du temps t : le délai (statistique) t précède l'arc de tension U_A , maintenu durant T_A . Ce dernier est suivi d'une interruption de durée T_I .

Les temps T_A et les interruptions T_I sont choisis indépendamment dans une gamme allant de 2 microsecondes à 1,6 milliseconde (12 positions avec une progression géométrique).

3.3.2.2. Générateur de puissance. C'est une alimentation dont la tension à vide est 80 volts ($U_B = 80V$) et dont on peut sélectionner le courant maximum qu'elle délivre. Lorsqu'il y a un arc, la tension aux bornes des électrodes est de l'ordre de 25 V et le courant de 4, 8, 16 ou 32 ampères suivant la puissance choisie par l'opérateur (fig 3.3.0.1)

3.3.3. GENERATEURS SUPPLEMENTAIRES. Afin de pouvoir ajuster la tension de claquage U_B (fixée à 80 V dans les générateurs de puissance CHARMILLES), nous utilisons une alimentation de tension branchée en parallèle aux générateurs 80 V.

3.3.3.1. Alimentation haute tension. C'est une alimentation dont la tension de claquage U_B est ajustable entre environ 80 volts et 270 volts. Elle ne délivre qu'un faible courant,

au maximum de l'ordre de 1 ampère. (non ajustable directement). Elle ne contient pas de pilote et doit par conséquent être commandée par un circuit extérieur. (pilote externe). (fig 3.3.0.1.).

3.3.3.2. Alimentation "très" haute tension. { 4 } Cette alimentation produit des impulsions dont la tension maximum peut atteindre 4KV. Le courant maximum qu'elle fournit en impulsion est très élevé, 50 ampères, ce qui donne de très courts temps de montée de la tension aux bornes des électrodes. Typiquement, pour des électrodes ayant une capacité de 1 nF à 20 ns/KV ! Pratiquement les temps de montée sont encore plus courts car les électrodes ont généralement des capacités plus petites que 1 nF (qui correspond à plus de 10 cm^2 d'électrodes).

Cette alimentation convenait bien pour des mesures de tension de claquage. Nous ne l'avons pas utilisée pour mesurer des délais statistiques.

3.3.4. CIRCUITS DIELECTRIQUES AUXILIAIRES

3.3.4.1. Cuve d'injection. { 5 } Récipient d'environ 10 litres, fermé, permettant d'injecter divers diélectriques dans le gap, moyennant la mise sous pression de la cuve. ($P_{\text{max}} = 20 \text{ bar}$). La cuve est munie d'un dispositif électromagnétique de contrôle de la contenance, relié à une alarme sonore. (fig 3.3.0.1)

3.3.4.2. Injecteur de diélectrique contaminé artificiellement
Il s'agit d'un piston repoussant le diélectrique contaminé dans le gap. Le cylindre dans lequel on prépare le diélectrique contaminé contient au maximum 1 litre de solution, mélangée continuellement par une hélice qui surmonte le piston, entraînée par un petit moteur.

3.3.4.3 Les débits du diélectrique sont mesurés par la chute de pression du diélectrique injecté dans un capillaire. Nous avons deux capillaires donnant des débits de respectivement 1,8 ml/min.bar et 25 ml/min.bar.

3.3.4.4 La filtration mécanique éventuelle du diélectrique se fait au moyen de filtres millipores dont les diamètres des pores sont compris entre 0,01 micron et 8 microns.

3.4 ELECTRONIQUE GENERALE

Nous nous contentons de décrire sommairement l'équipement spécifique à nos mesures et donnons les principales caractéristiques de l'appareillage développé dans le cadre du laboratoire. Les instruments de mesures courants (oscilloscope à mémoire ou rapide, atténuateurs et amplificateurs rapides, générateurs de signaux) sont passés sous silence dans ce paragraphe.

3.4.1 ELECTRONIQUE D'ACQUISITION DES DONNEES

3.4.1.1 Convertisseur temps {5} Ce circuit convertit la durée de l'impulsion TTL d'entrée, en un nombre binaire de 16 bits. Il contient une logique pour dialoguer avec l'interface de l'ordinateur. L'unité de temps du convertisseur peut être de 25 ns, 50 ns, 100 ns, 200 ns ou encore 400 ns suivant les délais moyens que l'on mesure; ce qui correspond à des temps maximum mesurables respectivement de l'ordre de 1,64 ms, 3,28 ms, 6,55 ms, 13,11 ms et 26,21 ms. Le convertisseur temps nous signale chaque mesure qui dépasse ses possibilités. ($> FFFF_{16}$). Il est essentiellement utilisé pour mesurer les délais statistiques.

3.4.1.2 Echantillonneur Ce circuit permet de mesurer la valeur d'un signal électronique à n'importe quel instant: de fait, ce circuit maintient la valeur analogique moyenne prise par le signal durant un temps ajustable entre 0,35 et 5 μ s.

La mesure débute avec un retard ajustable entre 0,17 et 3,5 μ s par rapport à un signal de synchronisation externe. (c.f fig 3.4.1.1) Un convertisseur analogue digital permet à l'ordinateur la lecture de la valeur mémorisée par l'échantillonneur avant la remise à zéro de ce dernier.

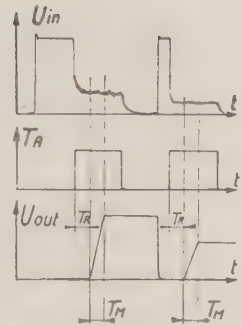


fig 3.4.1.1. Exemple d'utilisation d'un échantillonneur pour mesurer la valeur moyenne prise par la tension d'arc durant un instant de mesure T_M et après un retard T_P sur l'armageage. U_{in} est proportionnel à la tension entre les électrodes, le signal de synchronisation de l'échantillonneur marquant le début de l'arc est T_A .

3.4.1.3 Convertisseur analogue digital Il convertit 12 digits en 3,5 μ s et possède 8 entrées analogiques séparées. La séquence des successions de valeur à convertir peut se faire de diverses manières: elle est déterminée soit par un cablage externe, soit dans un ordre et dans des limites préprogrammées soit encore par une combinaison des deux modes précédents. On peut y inclure une condition de rejet d'une séquence de mesures à savoir que la première valeur convertie par l'ADC n'a pas été lue par l'ordinateur dans un délai imparti.

Les divers modes d' utilisation de ce tiroir permettent des relevés pratiques, de n'importe quel type de mesure, qu'il y ait un ou plusieurs paramètres à mesurer par décharge.

3.4.1.4 Echelles de comptages multiples Ce tiroir contient 4 échelles de comptages de $65536 = 2^{16}$ évènements et une logique permettant de le transformer en analyseur 4 canaux (respectivement 2 x 2 canaux). Pour ce faire, on connecte à une (respectivement 2) entrée, la sortie d'un (2) échantillonneur (s) et l'impulsion de synchronisation que ce (ces) dernier (s) délivre (nt). Le comptage se fait durant un

intervalle de temps sélectionnable entre 10 ms et 80 secondes, après ce délai, les résultats des 4 sommes sont mémorisés et le comptage recommence. L'ordinateur vient périodiquement lire ces nombres.

Le travail de ce tiroir pourrait être exécuté par l'ordinateur mais diminuerait d'autant la fréquence maximum des décharges à mesurer. Il a été surtout utilisé pour surveiller statistiquement des paramètres autres que ceux analysés par l'ordinateur. Il permet également l'acquisition par la même entrée de l'ordinateur de 2 données digitales indépendantes (par un multiplexage).

3.4.1.5 Voltmètre de pointe Il mémorise analogiquement une valeur proportionnelle à la plus grande valeur prise par un signal, pour autant que le signal ne soit pas plus court que quelques nanosecondes.

Ce voltmètre est utilisé pour mesurer les tensions de claquages du générateur "très" haute tension (3.3.2.4)

3.4.1.6 Mesure du gap Elle se fait par un capteur inductif, avec une précision de l'ordre du micron pour les petits gaps (typiquement 20 à 30 microns) et de l'ordre du pourcent pour les plus grands gaps (typiquement 150 microns).

L'électronique nous fournit une tension stabilisée proportionnelle à la valeur du gap, cette dernière est donc facilement lue par l'ordinateur via l'ADC.

3.4.2 ELECTRONIQUE DE COMMANDE

3.4.2.1 Pilote externe Par opposition au pilote interne du générateur CHARMILLES, il sert à commander l'étage de puissance de ces derniers selon la description du paragraphe 3.3.2.1. Il y a trois pilotes externes indépendants.

Le plus récent d'entre eux, celui qui offre le plus de possibilités d'utilisation peut être entièrement commandé par l'ordinateur: mise en route, arrêt, changement des durées, des interruptions T_I et des décharges T_A , commande décharge par décharge (ce que nous appelons le "régime de monodécharges"). Les pilotes externes ont une plage d'ajustage des durées T_I et T_A plus étendue que le pilote interne du générateur, à savoir jusqu'à 3,2 ms.

3.4.2.2 Programmeurs du gap Ces tiroirs permettent de travailler par cycles répétitifs, ils évitent ainsi une dérive des paramètres qui conditionnent l'électroérosion et améliorent notablement la reproductivité des mesures.

Le plus récent d'entre eux est digital: il mémorise les paramètres "durée" et "gap" pour chacune des 8 phases du cycle élémentaire de mesure. Le gap, s'il est constant, est ajustable entre 0 et plus de 250 microns, par pas de 1 micron. Si l'on désire qu'il varie, on peut injecter un signal quelconque dans le programmeur et le gap sera proportionnel à ce signal de pilotage. La durée de chaque phase est ajustable entre environ 0 et environ 65 secondes par pas de 1 ms (voir exemple de la fig. 3.4.2.1)

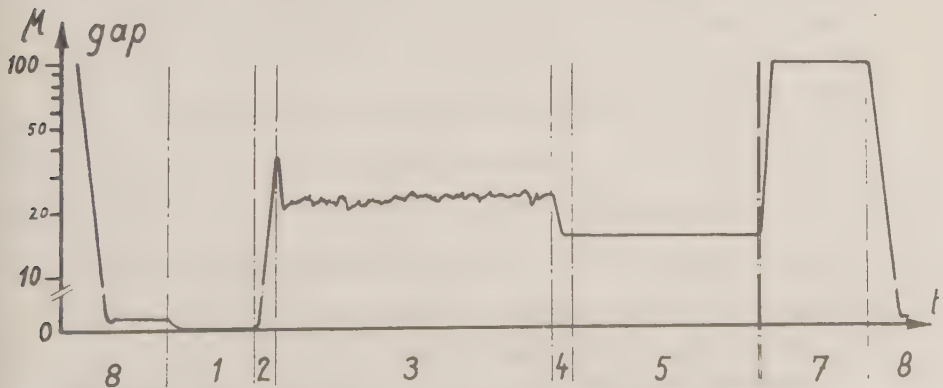


fig 3.4.2.1 Exemple d'utilisation du programmeur du gap: durant la phase 1, le gap est remis à zéro, durant la 2ème et 3ème phase, le gap est asservi à l'attente moyenne mais la tension n'est appliquée aux électrodes que durant la 3ème phase. La 4ème phase permet au gap de se stabiliser à une valeur constante pour la mesurer qui a lieu durant la 5ème phase. La 6ème phase n'est pas utilisée (durée nulle) alors que durant la 7ème les électrodes sont écartées pour permettre un renouvellement du diélectrique. Durant la dernière phase, le gap retourne à la valeur de consigne 0, ajustée au début du cycle.

(Relevons que le gap est fixe pour certaines des 8 phases: durant la dernière, le gap est constant à une grande valeur, typiquement 100 μ , pour permettre un nettoyage par injection de diélectrique propre; il lui succède la première phase durant laquelle l'actuateur du gap reçoit l'ordre d'amener l'électrode supérieure au contact avec l'électrode fixée sur la table de la machine, suivie d'une phase de remise à zéro de la mesure du gap, en fait une correction de l'usure des électrodes et d'une éventuelle dérive de l'électronique. Cette correction se fait avec une force d'appui entre les électrodes constante, ajustable).

3.4.2.3 Asservissement du gap Ce tiroir a la même fonction que l'asservissement interne du gap de la machine à électro-érosion. L'attente moyenne τ est comparée à une valeur de consigne U ajustable: lorsque $\tau > U$ le servomécanisme diminue le gap donc τ diminue et réciproquement pour $\tau < U$, par exemple dans le cas de courts-circuits où $\tau = 0$, le gap augmente.

3.5 L'ORDINATEUR ET SES PERIPHERIQUES

Nous ne donnerons ci-après que les principales caractéristiques de l'instrumentation du traitement des données. La justification du choix de cet appareillage étant décrit dans le travail de doctorat de Monsieur Rudolf {1} qui a développé et mis en route la configuration actuelle du miniordinateur et de ses périphériques.

3.5.1 MINIORDINATEUR: Texas Instrument TI980A

3.5.1.1 Mémoire Notre "mini" est équipé d'une mémoire MOS.

- Capacité de notre mémoire: 16384 mots de 16 digits + parité.
- 1 mot est lu ou chargé en 750 ns.
- La mémoire est rafraîchie toutes les 67 μ s. (diminution de vitesse de lecture en mémoire max 1,2 %).

- Subdivisée en 2 parties dont les limites inférieures et supérieures sont protégées contre un dépassement accidentel.
- Mémoire morte (ROM) pour initialisation à 8 entrées distinctes commandée sur le panneau frontal.

3.5.1.2 Unité centrale

- 8 registres de travail
- 1 registre de surveillance "STATUS"
- 98 instructions distinctes
- arithmétique pour nombres entiers cablée (TWO's complement)

addition : directe 0,75 μ s
registre + mémoire 1,75 μ s

multiplication : directe 5,25 μ s
registre x mémoire 6,25 μ s

division : directe 6.75 μ s
registre / mémoire 7.75 μ s

- arithmétique pour nombres décimaux par sous-routines.
- 15 modes d'adressages différents.
- Contrôle au maximum 256 périphériques différents.
- Nous n'avons pas la carte d'accès direct en mémoire DMAC
- 4 différents niveaux de priorité pour interruption du programme, 8 entrées d'interruptions externes sont câblées. (extensible jusqu'à 64 entrées).
- Unité de mesure de l'horloge interne 250 ns.

3.5.1.3 Lignes d'entrées-sorties: I/O BUS

- fréquence maximum de transmission de mots sur les lignes d'entrée-sortie : 130 kHz.

3.5.1.4 Programmes:

- Les programmes d'utilisations de l'ordinateur sont partiellement fournis par TI et partiellement développés par Monsieur Rudolf [1] qui a composé les différents moniteurs de la configuration actuelle.
- Les programmes de mesures sont décrits dans les paragraphes traitant des méthodes de mesures au chapitre suivant.

3.5.2 PERIPHERIQUES

La figure 3.5.2.1 nous précise l'entourage du miniordinateur. Cette configuration est extrêmement souple et efficace pour l'acquisition et le traitement des données. Le stockage de mesures est par contre relativement lent: 30 caractères par seconde pour les cassettes magnétiques avec une capacité maximum théorique de stockage de 155'000 caractères par face de cassette, ce qui permet de stocker typiquement (et pratiquement!) une vingtaine de mesures par face de cassette.

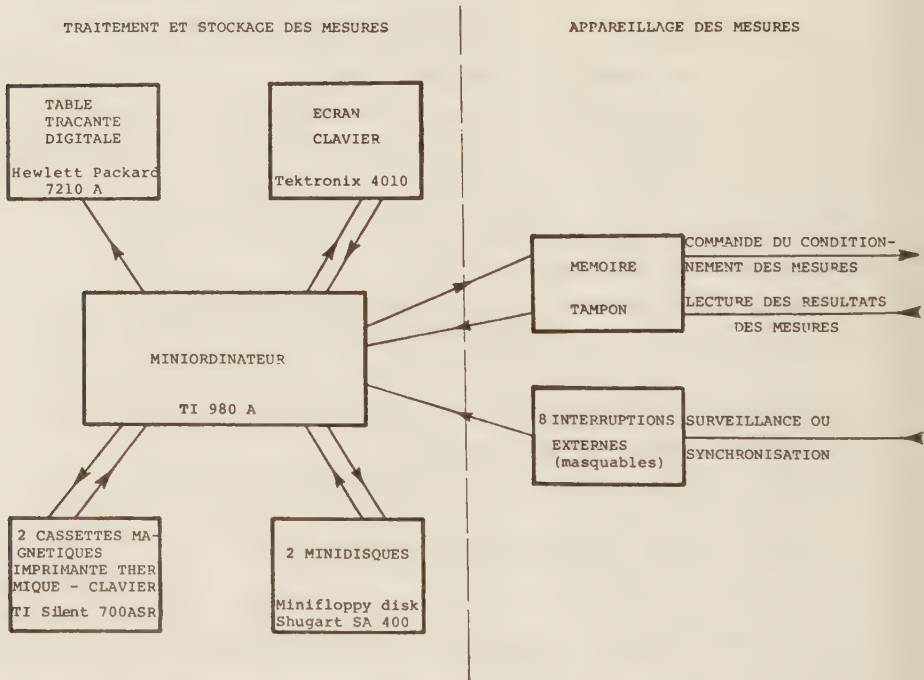


Fig 3.5.2.1 Configuration du miniordinateur et de ses périphériques

La faible vitesse de transcription des données ne permet pratiquement pas de mémoriser au fur et à mesure les grandeurs lues lors d'une expérience. Nous sommes obligés de travailler séquentiellement: on remplit la mémoire centrale de l'ordinateur avec des données expérimentales que l'on mémorise par la suite sur une bande en interrompant l'acquisition de nouveaux résultats.

Il en est de même avec les deux unités de "floppy disques" bien que la vitesse maximum théorique de transcription des données passe de 30 à plus de 15'000 caractères par seconde. Cette vitesse serait juste suffisante dans le cas de mesures en régime de monodécharges. ($T_I / (T_I + T_A + \tau) \approx 1$, quel que soit ($T_A + \tau$). La capacité de stockage théorique sur un minidisque est un peu plus petite que celle d'une cassette, les capacités pratiques sont pratiquement identiques. Le principal avantage des minidisques, dans notre cas, est qu'ils réduisent notablement le temps de compilation d'un programme.

CHAPITRE 4

TECHNIQUES DE MESURES MESURES ET RESULTATS

4.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous décrivons les différentes expériences faites au cours du travail de thèse et donnons un échantillon des relevés typiques que nous avons mesurés. Dans la mesure du possible, elles sont présentées successivement dans l'ordre dans lequel elles ont été effectuées. Nous n'en tirons que les principaux enseignements qui serviront de fil d'Ariane car elles peuvent paraître relativement incohérentes. Ces mesures seront discutées dans le chapitre 5 où nous tenterons d'en faire une synthèse.

4.2 COORDONNEES DES DECHARGES

Dans ce paragraphe, nous avons repris des extraits d'une de nos anciennes publications intermédiaires {6}{7}{8} et d'un rapport {9} non publié. Les mesures qui y sont décrites ont été relevées dans le laboratoire de recherches des Ateliers des Charmilles. Le miniordinateur utilisé était un Hewlett Packard

de type 2114 B équipé d'une mémoire de 8000 mots. Le traceur X-Y qui reproduit les résultats a une moins grande résolution que celui de l'université, ce qui n'est pas gênant compte tenu de la résolution du système de mesure. (La plume de ce traceur ne se relève pas entre les points à reproduire, il y a des "overshoots").

4.2.1 TECHNIQUE DE MESURE

4.2.1.1 Montage expérimental: "hardware" Les électrodes X-Y sont montées respectivement sur la table et sur la tête de la machine à électroérosion, et raccordée à l'interface "électrode X-Y - électronique" (c.f 3.2.1.3). Ce dernier donne à sa sortie les coordonnées X et Y d'une décharge que l'ordinateur ira lire. Pour ces mesures, il est important que l'ordinateur relève toutes les positions successives des décharges sans en sauter une seule, ce qui limite T_I à des valeurs supérieures à $15 \mu s$ si l'on ne mesure que la position des décharges et à environ $20 \mu s$ si l'on relève en plus de l'emplacement du claquage un autre paramètre de la décharge. Ces limites proviennent du temps nécessaire à l'ordinateur pour lire, mémoriser une ou plusieurs informations et faire les tests intermédiaires aux mesures. (Les électrodes et leur électronique pourraient travailler plus rapidement, mais au maximum de l'ordre de 500 KHz). L'ordinateur est utilisé de manière séquentielle: dans une première phase il accumule les données puis dans une seconde, il les analyse, ce cycle peut être répété plusieurs fois avant de sortir le résultat. Pour ces mesures le gap est asservi par le délai statistique moyen (c.f.3.4.2.3) Les premières mesures ont été relevées dans des conditions d'usinage "stationnaire", c'est-à-dire que l'usinage a débuté bien avant le début des mesures à proprement parler. Par la suite, nous avons relevé des mesures en partant d'un diélectrique propre, et avons observé l'évolution des positions de claquage.

4.2.1.2 Traitement des données: "software" Le choix du traitement n'est pas trivial. En effet, il serait souhaitable de présenter les résultats des mesures sous une forme simple, unique, indépendante de la géométrie des électrodes:

mieux encore de définir chaque mesure par un ou plusieurs paramètres. Nous avons essayé de quantifier nos relevés de cette manière, mais sans grands succès: les modèles de distributions connus ne correspondant qu'exceptionnellement aux distributions des décharges mesurées. La principale difficulté réside dans la grande diversité des résultats. Il n'existe donc pas de traitement unique des données satisfaisant les conditions décrites ci-dessus. La compilation des mesures devra être adaptée aux genres de distribution des décharges et aux mesures à effectuer.

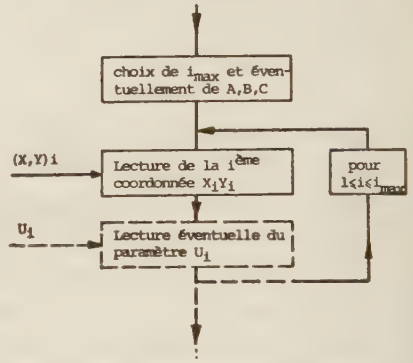


fig 4.2.1.1 Organigramme de l'acquisition des données position $X_i Y_i$ et paramètre U_i pour une succession de i_{max} décharges.

Nous avons finalement opté pour les formes de résultats suivantes, programmées en langage machine:

- Mesure en X-Y La forme de résultat la plus simple consiste à ne pas faire de traitement des données, mais simplement à mémoriser la succession de toutes les coordonnées X_i, Y_i des décharges pendant l'usinage (fig 4.2.1.1). On les restitue par la suite à l'aide d'un traceur à 2 dimensions (fig.

4.2.1.2). Les résultats mis sous cette forme sont difficilement interprétables et peu

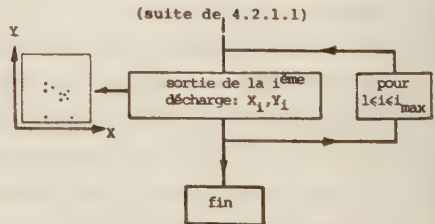


fig 4.2.1.2 Organigramme du "traitement" des mesures en X-Y.

parlants si l'on n'assiste pas directement à leur établissement. En effet une fois tracées, les mesures ne sont que la juxtaposition et la superposition de points représentant la position des étincelles. L'ordre dans lequel ils ont été tracés, donc la dimension temporelle, est perdue, et par là-même la notion de distance entre les décharges successives n'apparaît plus. Nous nous bornerons donc à ne présenter ici des mesures en X-Y que lorsqu'elles facilitent l'interprétation des autres formes de résultats ou pour décrire une phase particulière de l'usinage.

- Distributions Un effet de mémorisation spatiale peut être simplement mis en évidence en calculant la "distribution du nombre N de décharges, en fonction de la distance Δr qui sépare deux décharges consécutives". La distance Δr_i entre la $i^{\text{ème}}$ et la $(i+1)^{\text{ème}}$ étincelle est donnée par la relation:

$$\Delta r_i = \sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}$$

Les distributions présentent l'inconvénient de dépendre de la géométrie des électrodes de mesures, et de plus elles ne déterminent pas de manière univoque l'usinage en question: en effet, par exemple un usinage distribué sur toute la surface des électrodes avec une distance $\Delta r=K$ constante entre les décharges successives a la même distribution qu'un usinage en deux points seulement séparés par une distance $\Delta r=K$, pour autant que l'étincelle passe alternativement d'une position de claquage à l'autre: par ailleurs un même genre d'usinage peut être représenté par des distributions totalement différentes suivant l'instant et la durée de la mesure.

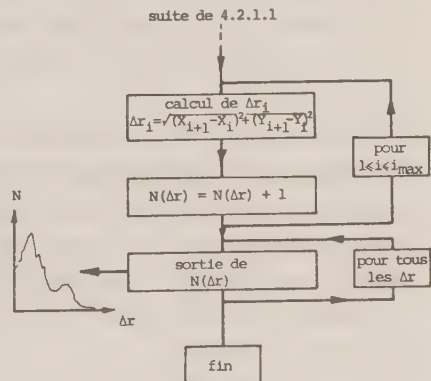


fig 4.2.1.3 Organigramme du traitement des données pour une mesure de distribution spatiale des positions de claquages.

D'autre part, l'évolution de la distribution au cours du temps n'apparaît pas avec cette forme de résultat puisqu'on se limite à accumuler les distances entre les étincelles sans tenir compte de l'ordre dans lequel ces sauts se sont produits.

- Distributions rapportées Il est possible de mettre les distributions sous des formes indépendantes de la géométrie des électrodes en procédant comme suit: on compare, pour chaque distance Δr , la distribution mesurée à une distribution de référence. Sur le graphique obtenu, on reporte donc le rapport $(N\Delta r \text{ mesuré}) / (N\Delta r \text{ référence})$ en fonction de Δr . Cette comparaison de deux distributions est théoriquement toujours possible. Malheureusement pour certaines mesures, il est difficile de trouver une distribution de référence telle que le résultat conserve un sens physique pour tous les sauts Δr . Par exemple pour des distributions avec un usinage simultané dans plusieurs zones de l'électrode.

Les distributions de références se subdivisent en deux catégories distinctes:

- D'une part, les distributions calculées analytiquement à partir d'un modèle simple et compte-tenu de la géométrie des électrodes: par exemple une répartition aléatoire des positions de claquage sur tout ou partie de l'électrode.

- D'autre part, des distributions de références également mesurées: par exemple en modifiant un des paramètres caractérisant l'érosion. La distribution rapportée est alors une bonne mesure de l'influence de ce paramètre. (Pour certains paramètres, il est même possible de mesurer simultanément la distribution de référence et la distribution mesurée à proprement parler).

- Distribution en fonction d'une variable Il est tentant de corrélérer certaines caractéristiques des distributions à des paramètres variables lors de l'usage. Ceci revient à décomposer virtuellement les distributions mesurées en fonction d'une variable qu'il faut naturellement mémoriser lors de la lecture. Pour chaque étincelle i , on relève donc les coordonnées $X_i Y_i$ et la valeur U_i de la variable U . (U_i est par exemple la tension de l'arc de la décharge i ou le délai statistique de la décharge i . Nous avons ensuite examiné les corrélations entre

$$\Delta r_i = \sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2} \text{ et } U_{i+1}$$

4.2.2 FACTEURS DE LOCALISATION La première série de mesures essentiellement des mesures de distributions, permet d'évaluer l'influence relative des nombreux paramètres ajustables qui conditionnent l'électroérosion avec impulsions de courant rectangulaires:

- Les durées " T_A " et " T_I "
- Le débit " D " du diélectrique de rinçage propre
- Le courant de pointe " I_a " de la décharge
- La distance frontale d'étincelage " g " (le gap)
- La tension à vide " U_b "
- Le temps d'attente moyen.

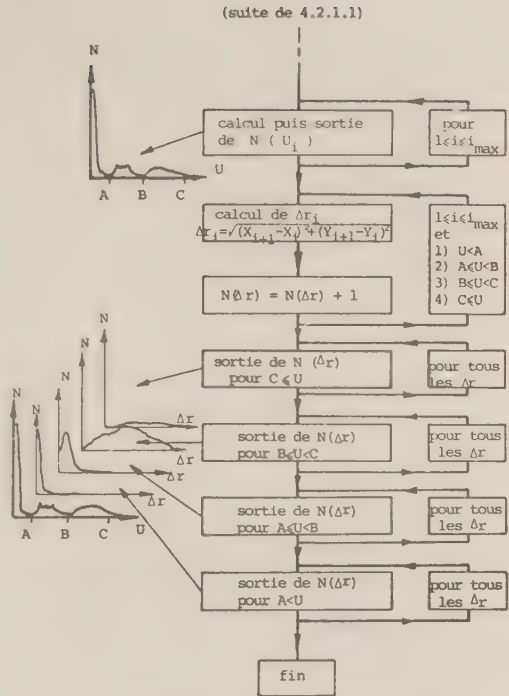


fig 4.2.1.4 Organigramme du traitement des données pour une mesure de distribution des positions de claquages pour différentes plages d'une variable U .

Pour des conditions d'usage identiques, les distributions sont souvent très différentes. Nous les avons regroupées en trois types de distributions spatiales de décharges à savoir:

4.2.2.1 Distribution aléatoire des décharges

Ce sont des distributions où toutes les valeurs possibles de distances apparaissent, les sauts Δr courts ou très grands étant moins fréquents (fig 4.2.2.1) Une mesure en X-Y de ce type de distribution est représentée sur la fig 4.2.2.2. Il n'y a apparemment aucune corrélation entre les décharges, les positions de claquages semblent aléatoires.

Compte-tenu de la géométrie carrée et de la résolution finie des électrodes de mesure (0,5 mm) on peut calculer la distribution obtenue en faisant l'hypothèse que la position d'une décharge est indépendante de la position des décharges précédentes.

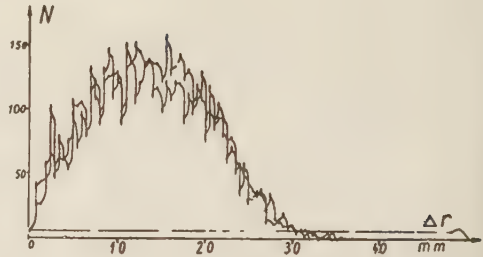


fig 4.2.2.1 Deux mesures de distribution du nombre N de décharges en fonction de la distance Δr avec laquelle elles se succèdent. $N_{\text{total}} = 2 \times 5000$, $I_{\text{arc}} = 36 \text{ A}$, $\bar{I} = 3 \text{ A}$, $T_A = 25 \text{ } \mu\text{s}$, $T_r = 100 \text{ } \mu\text{s}$, $\text{gap} = 27 \text{ } \mu$, débit D d'injection du diélectrique (Chevron EDM 71) D = 0 ml/min, Cu+ Ac-.

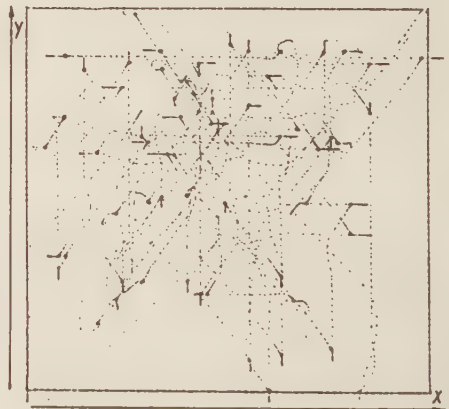


fig 4.2.2.2 Mesure en X-Y de la distribution représentée à la fig 4.2.2.1. (La plume ne se relève pas entre les points). Pour plus de clarté, la sortie du résultat est interrompue après environ soixante points.

En d'autres termes, la probabilité qu'une décharge éclate dans une zone quelconque de l'électrode est égale à la surface de cette zone divisée par la surface active totale de l'électrode de mesure. Nous appellerons "répartition aléatoire" la distribution ainsi calculée (fig 4.2.2.3) et "zone aléatoire" la distribution obtenue à partir de la même hypothèse, mais en limitant l'usinage sur une fraction de la surface usinable.

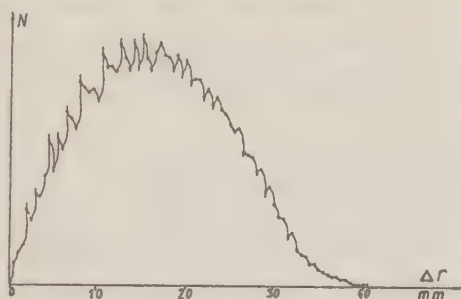


fig 4.2.2.3 Répartition aléatoire. Distribution calculée obtenue en admettant que les décharges se succèdent indépendamment les unes des autres sur une électrode rectangulaire de 32 x 32 mm avec une résolution de 0,5 mm.

La figure 4.2.2.4 représente une distribution du premier type, mesurée, rapportée à une répartition aléatoire. Ce graphique confirme l'hypothèse précédente (positions aléatoires) dans la mesure où il représente une droite horizontale. On remarquera toutefois que pour des petits sauts (au maximum de

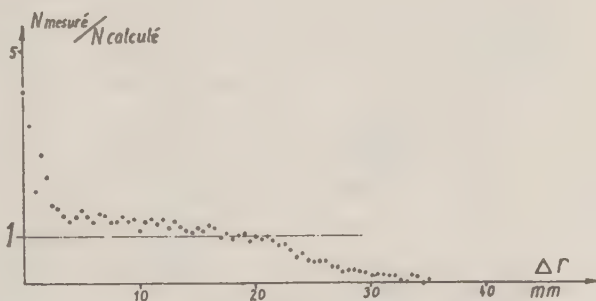


fig 4.2.2.4 Distribution mesurée rapportée à une répartition aléatoire.

2,5 mm), les distributions sélectionnées ne sont pas totalement aléatoires, mais qu'il subsiste un effet de mémorisation spatiale. De même, les déplacements Δr de l'ordre de la dimension

de l'électrode ne sont pas assez fréquents pour que l'usinage en question soit une répartition aléatoire. De fait, la figure 4.2.2.1 est une zone aléatoire couvrant la majeure partie de l'électrode. Un effet de bord (conditions aux limites) empêche que ce soit une répartition aléatoire. Cette distribution est obtenue lorsqu'il n'y a pas d'injection de diélectrique frais pour autant que la succession des décharges (l'usinage) ait commencé bien avant le début de la mesure à proprement parler.

4.2.2.2 Distribution fortement localisée Elle correspond à un usinage momentanément localisé dans une petite région de l'électrode. Ce régime peut être une zone aléatoire ou même passer par un maximum pour des distances $\Delta r = 0$ (En réalité $\Delta r = 0$ veut dire des sauts d'au maximum 0,5 mm qui est la résolution des électrodes) c'est-à-dire être très fortement localisé, il est facilement obtenu en injectant du diélectrique propre (fig 4.2.2.5).

La figure 4.2.2.6 nous montre un usinage fortement localisé qui devient et restera purement localisé.

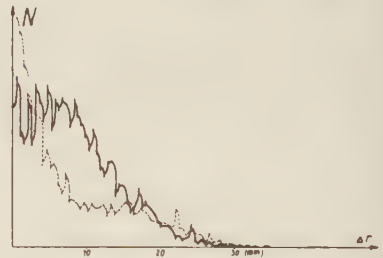


fig 4.2.2.5 Deux mesures de distribution pour des décharges momentanément regroupées dans une petite partie de l'électrode. $N = 2 \times 2500$ décharges. $I_{arc} = 18$ A $I = 0$ A, $T_d = 3$ μ s, gap = 23 μ . La mesure en pointillé est relevée avec une injection de diélectrique frais par opposition à celle en trait continu.

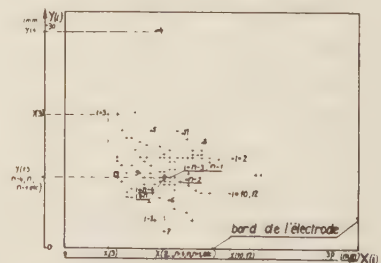


fig 4.2.2.6 Positions consécutives des décharges sur la surface usinable. La croix "+1" de coordonnées x_1 et y_1 repère la position de la 1^{re} décharge. Au cours du temps les sauts deviennent plus courts. Dès la n^o décharge (n est de l'ordre de 120), l'usinage dégénère en un arc destructif en x_n , y_n au centre de la zone.

4.2.2.3 Distribution avec 2 maxima (fig 4.2.2.7) Le premier pour des sauts nuls ou très petits tel celui des distributions fortement localisées, décrites précédemment. Le deuxième maximum pour des sauts Δr de l'ordre de la demi électrode c' est-à-dire environ 15 mm. La proportion du nombre d'évènements dans chaque maximum varie fortement.

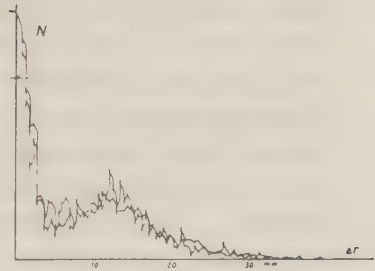


fig 4.2.2.7 Distributions pour des décharges qui éclatent dans plusieurs zones distinctes de l'électrode. (voir fig 4.2.2.8). $N = 2 \times 2500$ décharges $I_{arc} = 36$ A, $I = 10$ A, $T_A = 25$ μ s, débit d'injection nul, gap = 27 μ .

Ce type de distribution est obtenu pour des décharges qui éclatent en plusieurs zones distinctes bien délimitées de l'électrode. Les déplacements Δr du lieu de claquage sont donc soit petits (usinage dans une des zones) soit grands (déplacement d'une zone à l'autre comme on le voit sur la figure 4.2.2.8)

Ce dernier type de distribution est facilement obtenu en début d'usinage, lorsque le diélectrique est encore propre, ou en injectant du diélectrique propre.

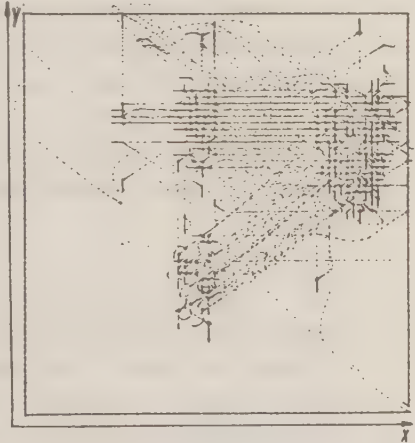


fig 4.2.2.8 Mesure en X-Y correspondant à la distribution 4.2.2.7.

Cette classification grossière favorise une description simple d'un usinage et de son évolution. Au cours des mesures, on passe souvent d'un type de distribution à un autre ou à une combinaison de ces types. Les résultats sont donc fonction de l'instant et de la durée des mesures, bien plus qu'ils ne dépendent des paramètres dénombrés au début de ce paragraphe dans la plage respective de leur gamme de réglage. Il n'y a pas de correspondance univoque entre les conditions d'usinage et les divers types de distributions décrits précédemment à l'exception du paramètre D débit de rinçage du diélectrique en effet:

- Il faut que le débit D du diélectrique de rinçage soit nul pour enregistrer une répartition aléatoire. Les distributions sont alors généralement stables.
- Un débit non nul du diélectrique de rinçage entre les électrodes de mesure donne lieu à des distributions du deuxième ou troisième type.

La grande variété des distributions et leur manque apparent de reproductivité rend difficile l'interprétation de ces mesures.

Nous avons constaté que les distributions sont fonction des emplacements des décharges précédentes, elles dépendent de l'"histoire proche" des positions de claquage: il apparaît donc un EFFET DE MEMORISATION SPATIAL: l'"agent", le support de cette mémorisation est généralement solidaire du diélectrique et non des électrodes car un brusque déplacement du diélectrique par une injection latérale entraîne momentanément les zones des décharges avec lui. Cette constatation n'est vraie que dans la mesure où le champ électrique créé par les électrodes reste homogène (pas de trop grosses aspérités ou discontinuités de l'état physique des surfaces des électrodes).

Au prochain paragraphe nous tenterons de décrire les modifications apportées au diélectrique par les décharges, modifications que nous appelons contamination.

De l'ensemble des premières mesures de distribution et de position des décharges, il ressort que la contamination du diélectrique et sa répartition dans l'interface entre les deux électrodes est le facteur primordial de la localisation des décharges pour des usinages stables.

Les remarques précédentes concernant le débit D du diélectrique le prouvent: particulièrement dans notre géométrie avec injection centrale du diélectrique propre, qui localise le diélectrique contaminé, ce qui crée les zones de décharges observées. Le "brassage" du fluide déplace ces zones, raison pour laquelle ces distributions sont peu reproductibles, et fonction de l'instant de la mesure. L'observation d'une répartition aléatoire ne peut se faire qu'avec une contamination homogène dans tout le gap donc seulement avec D nul. Cette contamination ne dépend pas de manière univoque des paramètres qui caractérisent les décharges, il est dès lors évident qu'il en sera de même pour nos mesures, faits que nous avons constatés.

4.2.3 CORRELATION ENTRE LE DELAI D'AMORCAGE t ET LA DISTANCE Δr DE LA PRECEDENTE DECHARGE

Nous avons mis en évidence une corrélation moyenne peu marquée entre les délais d'amorçage $t_i + 1$ et la distance $\Delta r_i = \sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}$ qui sépare la décharge i de la $(i+1)$ ème.

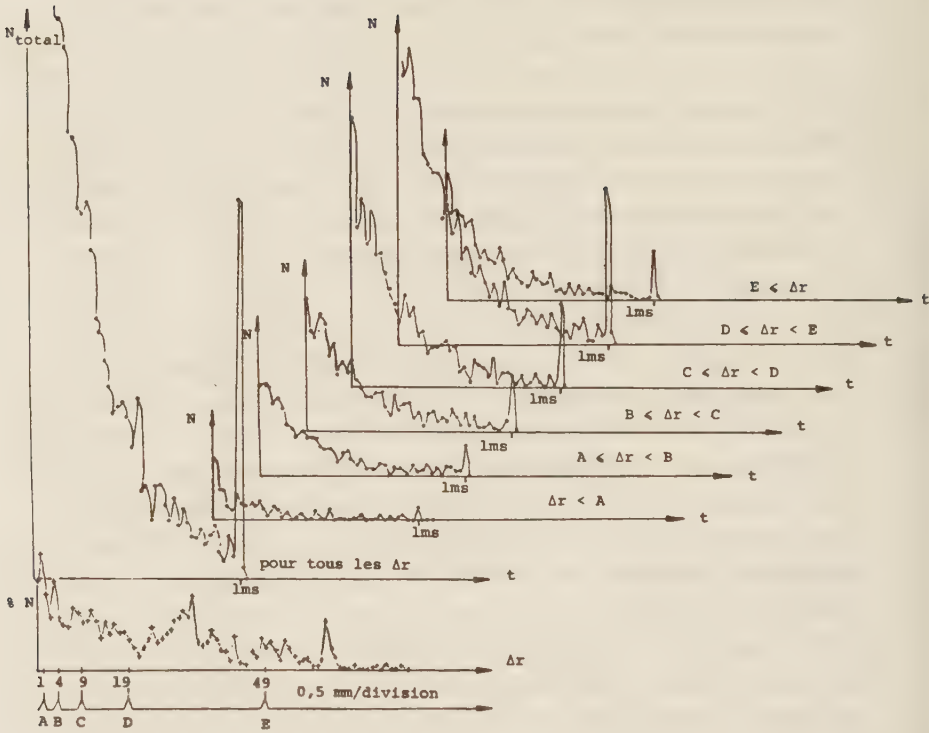


fig 4.2.3.1 De bas en haut: $N(\Delta r)$: distribution spatiale de décharges avec les limites des canaux pour l'analyse en fonction des délais d'amorçage (échelle N linéaire arbitraire).
 $N_{total}(t)$: distribution de l'ensemble des délais d'amorçage. - 6 courbes $N(t)$ pour les diverses plages de distances Δr sélectionnées. Les 7 histogrammes des délais d'amorçage ont des ordonnées linéaires, de plus dans le canal du délai maximum mesurable t_{max} on accumule les décharges de délai $t > t_{max}$

La figure 4.2.3.1 représente un relevé typique de ces mesures. Les distributions des délais d'amorçage sont ensuite reportés sur un papier semi-logarithmique puisqu'elles sont exponentielles: $N(t) = N_0 \exp(-t/\tau)$. (fig 4.2.3.2). On en tire τ pour les différentes plages de sauts Δr .

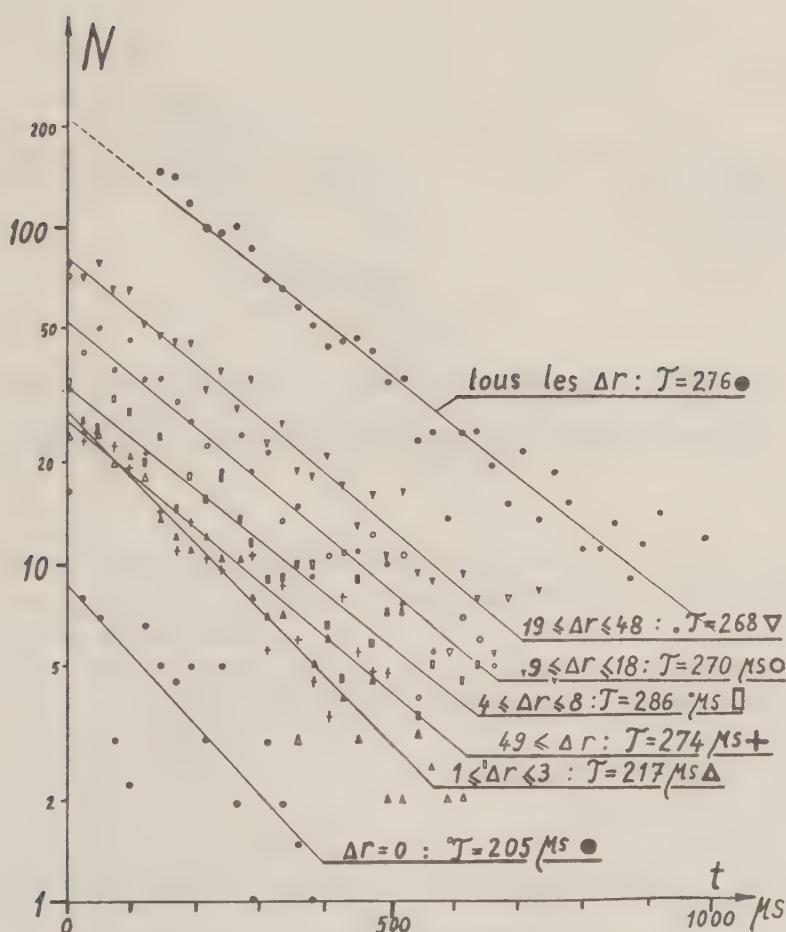


fig 4.2.3.2 Distribution des délais d'amorçage de la figure 4.2.3.1 avec une ordonnée logarithmique.

Ces délais d'amorçage moyens τ sont reportés en fonction des plages de sauts Δr sur la figure 4.2.3.3 avec d'autres mesures analogues, sous forme de récapitulatif.

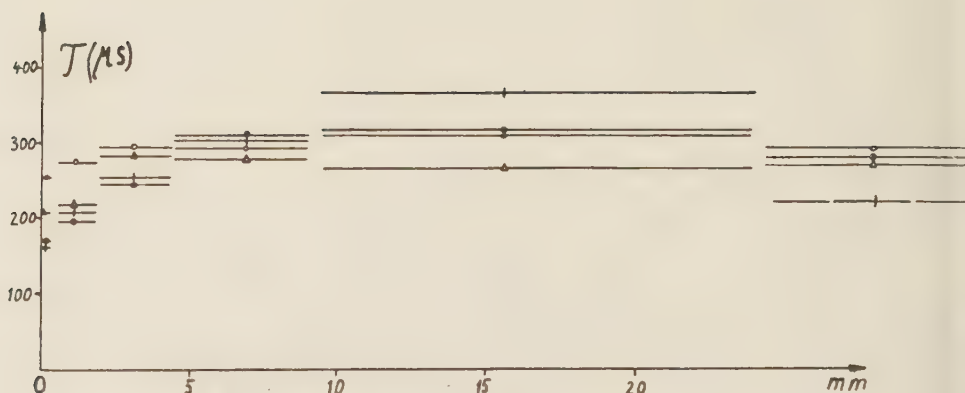


fig 4.2.3.3 Délais d'amorçage moyen en fonction des plages de distances Δr , pour différents débits D d'injection du diélectrique et différentes valeurs du courant moyen $\bar{I}$ des décharges.

On constate une légère diminution de τ pour des sauts courts, cet effet est sensible pour des Δr d'au maximum 5 mm, c'est-à-dire des sauts très courts. Il est remarquable que cette diminution ne soit pas affectée par des modifications importantes du conditionnement des décharges: dans le résumé de ces résultats, à la figure 4.2.3.3, la pression d'injection du diélectrique varie entre 0 et 5 atm, et le courant moyen d'usinage entre 3 et 10 A. (Pour mémoire ces mesures sont relevées avec un gap asservi par le délai d'amorçage moyen τ ce qui explique la plage limitée de ce paramètre).

4.2.4 CORRELATION ENTRE LES DISTRIBUTIONS SPATIALES ET LA TENSION D'ARC U_A .

4.2.4.1 Classification des décharges en fonction de U_A

Lors de précédentes recherches {10}{11}{12} il a été montré que les tensions d'arcs U_A ne sont pas simplement réparties autour d'une valeur moyenne dépendant du conditionnement du

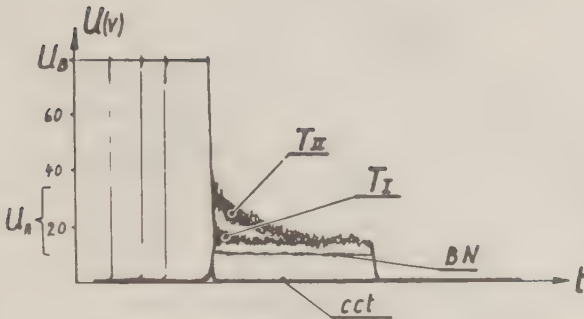


fig 4.2.4.1 Superposition de la tension de plusieurs décharges en fonction du temps: la tension d'arc des décharges de type II (T_{II}) prend sa valeur moyenne d'équilibre après celle de type I (T_I). Les décharges du type bas niveau (BN) ont une tension d'arc stable, peu dispersée et plus faible que les précédentes, mais bien plus grande que les courts-circuits (cct.).

milieu de claquage, mais qu'elles présentent plusieurs maxima particulièrement visibles immédiatement après l'amorçage.

fig 4.2.4.1

- T_{II} : Décharges de type II. La tension d'arc finale de ces décharges n'est pas atteinte rapidement. Elles sont précédées d'un délai d'amorçage non nul.
- T_I : Décharges de type I. La tension d'arc moyenne de ce type de décharges est pratiquement atteinte dès l'amorçage qui n'est pas obligatoirement précédé d'un délai d'amorçage non nul.
- BN: Bas niveaux. Ces décharges ont une tension d'arc un peu plus faible que les précédentes, plus stable, les composantes de hautes fréquences qui se superposent à la valeur moyenne de U_A sont également moins marquées que pour les T_I et T_{II} . Les B.N. ne dégénèrent pas forcément en un arc caractéristique, localisé qui lui doit être interrompu par une intervention extérieure.

Un échantillonnage des tensions d'arc pour différentes valeurs de gap est typiquement représenté par la figure 4.2.4.2.

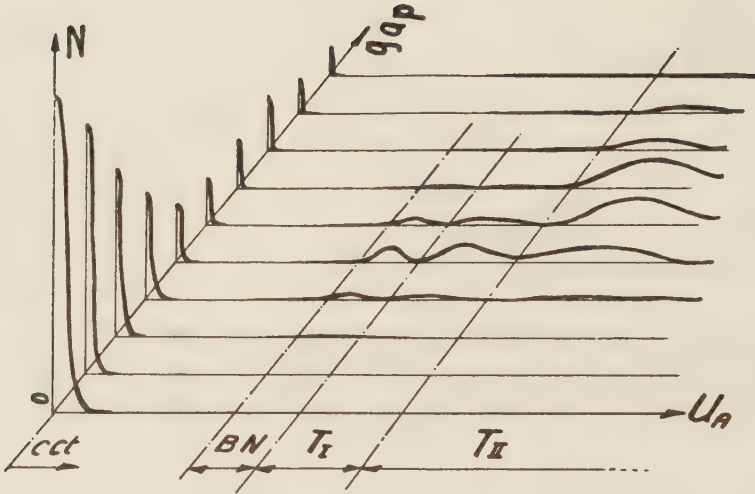


fig 4.2.4.2 Nombre N de décharges en fonction de la tension d'arc U_A pour diverses valeurs du gap. (U_A est mesuré un court instant après l'amorçage c.f. fig 4.2.4.1.; échelles arbitraires).

Notons que nous n'avons pas une idée claire des différences physiques qui sont la cause de ces types de décharges.

4.2.4.2 Distribution spatiale en fonction du type de décharge. Nous allons montrer qu'il existe une corrélation très nette entre les types de décharges et les distributions spatiales. Remarquons que tous les types de décharges (cct, BN, T_I et T_{II}) sont difficiles à réunir simultanément dans une seule mesure car leur présence dépend forcément du conditionnement des mesures plus particulièrement de l'injection de diélectrique propre. Pour certaines de ces mesures nous avons modifié la géométrie des électrodes X-Y: nous avons partiellement usiné la surface carrée (30 mm x 30 mm) de l'électrode de manière à en dégager une couronne sur laquelle se produiront les décharges (ϕ intérieur: 10 mm, ϕ extérieur 26 mm)

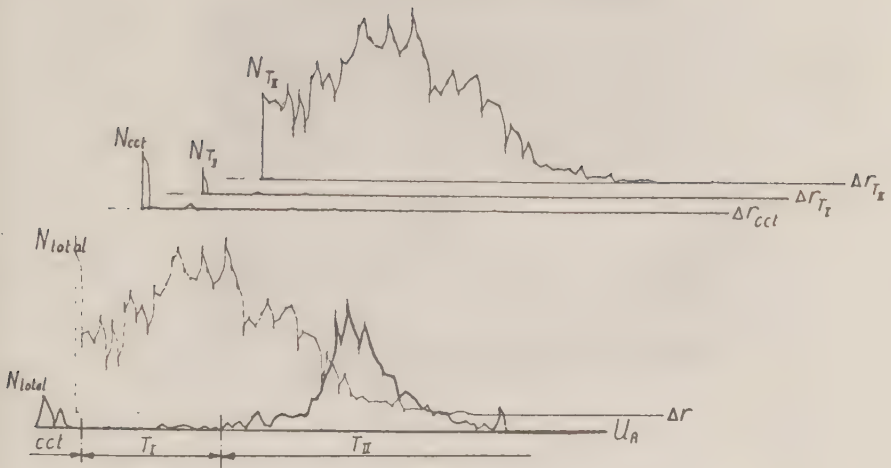


fig 4.2.4.3 De bas en haut: - $N_{total}(U_A)$: distribution des tensions d'arc mesurées 200ns après l'amorçage. - $N_{total}(\Delta r)$: distribution spatiale de l'ensemble des décharges. - Puis les distributions spatiales respectivement des cct, des types I, et des types II selon les subdivisions marquées sur la distribution des tensions d'arc. $Cap = 50\mu$, $I = 5A$, $T_A = T_I = 25\mu s$, $D = 0ml/min$, $U_B = 80V$, $I_a = 16A$, échelles linéaires.

- Les décharges de type II ont des distributions spatiales fonction de la répartition de la contamination dans le diélectrique, par exemple aléatoires lorsque le débit de l'injection D est nul et la contamination relativement homogène dans le gap: fig 4.2.4.3 et 4.2.4.4. Les T_{II} se regroupent dans une zone aléatoire avec une injection D non nulle: fig 4.2.4.5.
- Les décharges de type I sont plus localisées que les T_{II} , avec notre géométrie, nous n'avons pu les mettre en évidence en quantité non négligeable qu'avec une forte injection: fig 4.2.4.5
- Les "bas niveaux" BN sont toujours fortement localisés: typiquement le 50% de ces décharges ont des déplacements Δr nuls alors que les T_{II} mesurés simultanément sont aléatoires fig 4.2.4.4.

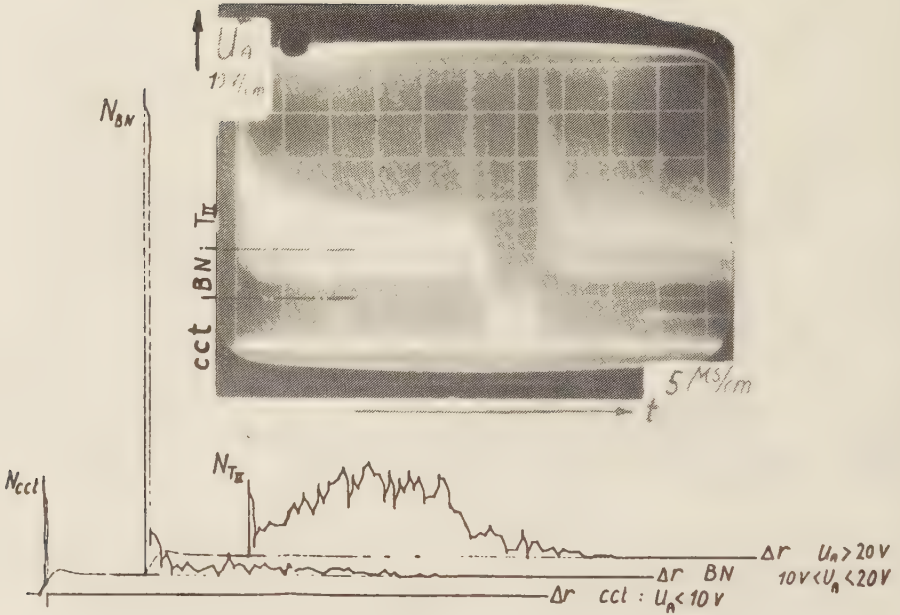


fig 4.2.4.4 Distribution spatiale des décharges représentées pour les trois plages de tension d'arc définies sur la photographie. Ce cliché est relevé durant l'acquisition des mesures par l'ordinateur superposé à la trace des cct, on y voit la fenêtre de mesure de l'échantillonneur qui prélève la tension d'arc 12 μ s après l'amorçage. Gap = 30 μ , I = 10A, T_A = 25 μ s, T_I = 6 μ s, D = 0ml/min, U_B = 80V, I_A = 16A, échelles linéaires

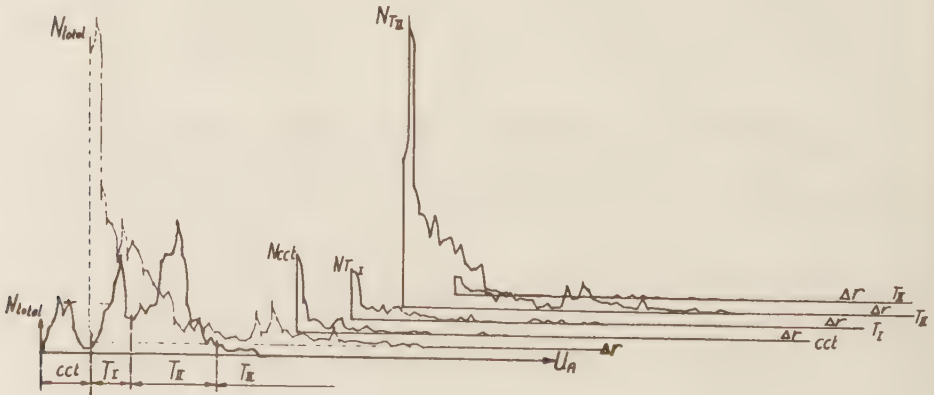


fig 4.2.4.5 De bas en haut: - $N_{total}(U_A)$: distribution des tensions d'arc mesurées 200 ns après l'amorçage. - $N_{total}(\Delta r)$: distribution spatiale de l'ensemble des décharges. - Puis les distributions spatiales respectivement des cct, des types I, des types II selon les subdivisions marquées sur la distribution des tensions d'arc. Gap = 30 $\pm$ 10 μ , I = 0,5A environ, T_A = 50 μ s, T_I = 3,2 ms, D > 0 ml/min, U_B = 80V, I_A = 16A, échelles linéaires.

Nous avons également mesuré la moyenne arithmétique de U_A en fonction de la distance Δr séparant deux décharges consécutives. Ces relevés confirment les mesures précédentes, à savoir que les décharges fortement localisées ont des tensions moyennes U_A plus petites que les autres décharges.

- Les distributions spatiales des courts-circuits sont toujours fortement localisées, avec un maximum pour des sauts Δr nuls. La proportion de cct faisant des déplacements non nuls est au maximum de quelques pour cent s'il y a de fortes turbulences dans le diélectrique, et de longs intervalles T_I entre les décharges. Remarquons que la tension des courts-circuits n'est pas purement nulle, mais distribuée entre zéro et plusieurs volts. Le grand nombre de cct avec déplacements Δr nuls ou petits laisse supposer qu'ils sont provoqués par le métal érodé qui crée au voisinage immédiat de l'arc des microsoudures ou des ponts reliant les deux électrodes, ce qui explique la distribution des tensions de cct.

Dans le cas de diélectrique trop contaminé, ce dernier se comporte localement comme un milieu conducteur, la tension U_B chute, les décharges n'ont plus de coordonnées bien définies, il circule un courant fonction de la densité de contamination dans le gap.

4.2.5 EVOLUTION TEMPORELLE DES DISTRIBUTIONS SPATIALES DES DECHARGES

4.2.5.1 Introduction Toutes les distributions décrites précédemment ont été mesurées après un relativement long temps de conditionnement du milieu de mesure, à un instant où le régime d'érosion est supposé stable. Dans ce paragraphe, nous voulons observer les distributions spatiales des décharges dès les premiers claquages, voir si elles évoluent pour atteindre une valeur stationnaire. Nous voulons initialement par ce biais

étudier les processus de diffusion des résidus d'électroérosion. Cette idée fut rapidement abandonnée au profit des mesures avec les électrodes concentriques. Nous ne décrirons donc que succinctement les premiers résultats de nos observations parce qu'ils confirment l'importance des perturbations apportées au diélectrique par les décharges et présentent un certain intérêt technologique.

Nous sommes à nouveau confrontés à un problème de description, de paramétrisation de nos distributions. Nous introduisons deux quantités pour les décrire:

- $\Delta r(N_{\max})$ est la distance la plus fréquente entre deux décharges consécutives. Par exemple:
 $\Delta r(N_{\max}) = 15 \text{ mm}$ pour une répartition aléatoire
 $\Delta r(N_{\max}) = 0$ pour un usinage fortement localisé
Les valeurs intermédiaires correspondent à des zones aléatoires plus ou moins localisées.
- D_{Li} le degré de localisation d'ordre i du régime des décharges, défini par la proportion de claquages faisant des sauts $\Delta r \leq i$

$$D_{Li} = \frac{\sum_{\Delta r=0}^i N(\Delta r)}{\sum_{\Delta r} N(\Delta r)}$$

par exemple $D_{L0} = 2,44 \cdot 10^{-4}$ pour une répartition aléatoire et par opposition $D_{L0} = 1$ pour des décharges qui éclatent toujours au même endroit. (les valeurs données en exemple = notre géométrie carrée 64 x 64 divisions, environ 30 mm x 30 mm)

4.2.5.2 Technique de mesure Chaque mesure débute avec un gap propre, rincé par le trou central et par une forte injection latérale. On interrompt alors l'injection et l'on fait une série de décharges à un régime sélectionné (T_A , T_I , I_A , τ),

typiquement 35'000 claquages. Ces décharges sont comptées: ce qui permet de les repérer dans le temps. On relève alors, durant la mesure, à 10 reprises les distributions d'amorçage. Le gap est ensuite soigneusement rincé et l'on recommence une mesure que l'on accumule à la précédente, et ceci typiquement 200 fois. Les distributions ont par exemple été relevées entre:

- | | | | |
|-----|--------------|-----------------|----------|
| 1) | la 1ère | et la 2ème | décharge |
| 2) | la 5ème | et la 10ème | décharge |
| 3) | la 20ème | et la 30ème | décharge |
| 4) | la 50ème | et la 60ème | décharge |
| 5) | la 200ème | et la 300ème | décharge |
| 6) | la 500ème | et la 600ème | décharge |
| 7) | la 2000ème | et la 2100ème | décharge |
| 8) | la 10'000ème | et la 10'200ème | décharge |
| 9) | la 20'000ème | et la 20'200ème | décharge |
| 10) | la 30'000ème | et la 30'500ème | décharge |

Les 10 distributions sont ensuite normalisées pour la comparaison.

Le gap était asservi durant la mesure et programmé durant le rinçage. Au début de chaque mesure il était soit en court-circuit, soit beaucoup plus grand que la valeur d'asservissement.

4.2.5.3 Description de l'évolution des distributions. La figure 4.2.5.1 représente un exemple de mesure qui débute à gap nul, avec la courbe D_{L0} en fonction du numéro d'ordre de la succession des décharges.

D'une manière générale le degré de localisation D_{L0} diminue pour tendre vers une valeur d'équilibre. D_{L0} pour les premières décharges d'une mesure qui débute en court-circuit est 1, (fig 4.2.5.1) alors que pour les mesures qui débutent avec un grand gap le degré de localisation initial est faible (environ $5 \cdot 10^{-2}$) puis il passe rapidement par un maximum avant de tendre vers la valeur d'équilibre. Cette valeur d'équilibre est atteinte après un certain nombre de décharges iso-énergétiques et non après un certain temps. (fig 4.2.5.2)

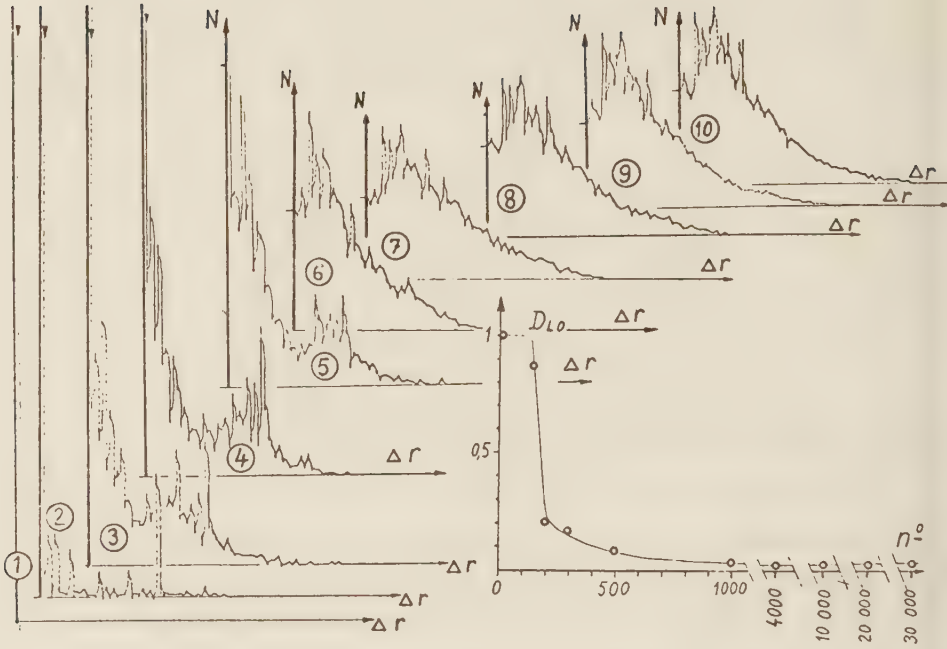


fig 4.2.5.1 Degré de localisation D_{LO} en fonction du numéro d'ordre de la succession des claquages
Les 10 distributions spatiales, de gauche à droite, qui ont servi à déterminer les D_{LO} ont été relevées respectivement pour...

... la 1ère distribution entre la 1ère	et la 10ème décharge
la 2ème distribution entre la 150ème	et la 170ème décharge
la 3ème distribution entre la 200ème	et la 220ème décharge
la 4ème distribution entre la 300ème	et la 320ème décharge
la 5ème distribution entre la 500ème	et la 520ème décharge
la 6ème distribution entre la 1000ème	et la 1100ème décharge
la 7ème distribution entre la 4000ème	et la 4200ème décharge
la 8ème distribution entre la 10'000ème	et la 10200ème décharge
la 9ème distribution entre la 20'000ème	et la 20500ème décharge
la 10ème distribution entre la 30'000ème	et la 30500ème décharge

le gap initial est nul, $T_A = 12,5 \mu s$, $T_I = 50 \mu s$, $\tau = 10 \mu s$, $I_A = 16A$, 5mJ par décharge.

Les distributions se stabilisent peu après la 500ème décharge, il y a 150 à 200 décharges avec $U_A = 0V$ au début de chaque cycle de mesure.

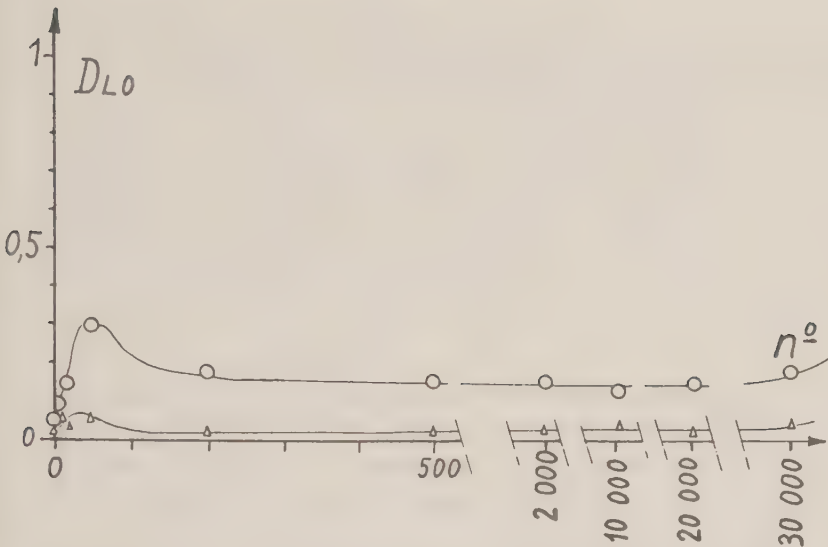


fig 4.2.5.2 Degré de localisation en fonction du numéro d'ordre des décharges. Les deux mesures ont un gap initial ouvert, $T_A = 12,5 \mu s$, $I_A = 16A$, $T_I = 50 \mu s$, 5 mJ/décharge . L'asservissement du gap est différent, la fréquence de claquage, donc l'échelle du temps l'est aussi: $\phi = 16 \text{ kHz}$, $\Delta = 2,5 \text{ kHz}$. Les 2 distributions sont stabilisées dès la 200ème décharge.

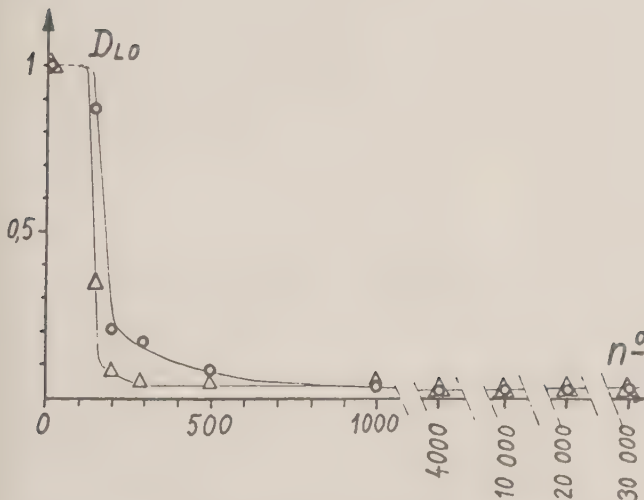


fig 4.2.5.3 Degré de localisation en fonction du numéro d'ordre des claquages. Les deux courbes ne se distinguent que par le courant d'arc, donc l'énergie des décharges: $T_A = 12,5 \mu s$, $T_I = 50 \mu s$, $\tau = 15 \pm 10 \mu s$. $\phi = 16A$, 5 mJ/décharge , $\Delta I_A = 32A$, 10 mJ/décharge . Les distributions des mesures plus énergétiques sont plus rapidement stabilisées: dès la 250ème respectivement 500ème décharge.

Si l'on augmente l'énergie des décharges il en faut un moins grand nombre pour obtenir des distributions stables. fig 4.2.5.3. Tout se passe donc comme s'il fallait dissiper une quantité d'énergie donnée dans le diélectrique pour obtenir des degrés de localisations constants. Cette énergie peut être estimée à $1,75 \text{ J}$,

1,5 J et 1,75J, 1,75J respectivement pour les figures 4.2.5.1, 4.2.5.2 et 4.2.5.3. (ne pas prendre en considération les premières décharges avec $U_A = 0$ pour un gap initial en court-circuit). Il est utile de préciser que le gap a atteint sa valeur d'équilibre bien avant les distributions. Pour certaines conditions de mesures, il arrive que les distributions dégénèrent en une succession de décharges localisées: D_{L0} tend vers 1, pratiquement cela se présente comme une inversion de l'échelle du temps dans la figure 4.2.5.1.

Les descriptions précédentes peuvent se faire avec des degrés de liberté D_{Li} d'ordre i supérieurs, les résultats sont similaires, mais plus pondérés, toutefois il faut que i reste bien inférieur aux distances maxima qui séparent deux décharges consécutives !

Nous avons constaté que le degré de localisation peut servir de critère de stabilité pour un régime de décharge donné. Par exemple dans la gamme de paramètres que nous avons parcourue pour ces mesures ($I_A < 32A$, $T_A < 50\mu s$, fréquence des décharges < 10 kHz) la valeur $D_{L0} = 0,2$ est une valeur limite à ne pas dépasser si l'on veut éviter une localisation des décharges. Cette valeur limite dépend fortement du taux de répétition des décharges.

4.3 CONTAMINATION DES DIELECTRIQUES

4.3.1 INTRODUCTION

Dans notre laboratoire nous travaillons avec deux diélectriques très différents: d'une part avec de l'eau distillée, d'autre part avec une huile minérale "Chevron EDM 71" dont les principales caractéristiques sont:

- viscosité à 20°C $5,4 \cdot 10^{-3}$ Ns/m²
- viscosité à 40°C $3,2 \cdot 10^{-3}$ Ns/m²

- masse volumique (15°C): 830 kg/m³
- principaux constituants: 68 % paraffine
25 % hydrocarbure polycyclique
7 % aromates

Sans vouloir généraliser, relevons que les résultats de mesures similaires obtenus avec ces deux différents diélectriques contaminés par des décharges sont essentiellement semblables ! Examinons de plus près les modifications apportées au diélectrique par le taux de répétition élevé des décharges qui y éclatent :

Nous appelons contamination l'ensemble des perturbations modifiant le résultat d'une quelconque mesure, par rapport au résultat d'une mesure analogue, virtuelle, qui serait relevée dans des conditions de références, dans notre cas, avec un diélectrique techniquement pur, entre deux électrodes à surfaces planes parallèles, ces perturbations étant en équilibre avec le milieu environnant. Cette contamination peut être de différentes natures: d'origine mécanique (résidus d'érosion en suspension) ou gazeuse (présence de bulles) thermique (variation locale ou, et moyenne de la température) électrique (présence de charges électriques). Ces différentes formes de perturbations qui ensemble constituent la contamination telle que nous la définissons peuvent être fonction du temps et du lieu et s'atténuer ou au contraire présenter des aspects cumulatifs. Arbitrairement nous subdivisons la contamination en deux catégories:

- La contamination du diélectrique, solidaire du liquide et par opposition
- La contamination superficielle des électrodes qui est attachée à la surface usinable des électrodes par exemple un changement d'état de surface ou une adsorption de molécules.

4.3.2 CONTAMINATION NATURELLE

4.3.2.1 Une observation microscopique d'une huile contaminée, noire, montre qu'elle contient beaucoup de carbone sous forme

floconneuse "ouatée" (et non colloïdale) liée à de petites sphères de métal érodé, alors qu'initialement elle était claire, comme de l'eau. Si on la laisse décanté, après quelques heures, les matières solides occupent typiquement le demi volume inférieur du récipient, la surface de séparation entre liquide et "solide" est plane et bien définie au-dessus de laquelle l'huile reste légèrement jaune. Après plusieurs jours de décantation, le résidu décanté s'est tassé et occupe encore jusqu'à 10% du volume initial de l'huile contaminée.

La concentration volumique de métal érodé dans le diélectrique va typiquement jusqu'à 10^{-3} . La dimension des particules érodées dépend de l'énergie et de la puissance des arcs. Une distribution des diamètres des sphères métalliques érodées est montrée à la fig 4.3.2.1 Ces particules sont relativement bien fixées au carbone, ce qui diminue considérablement leur mobilité.

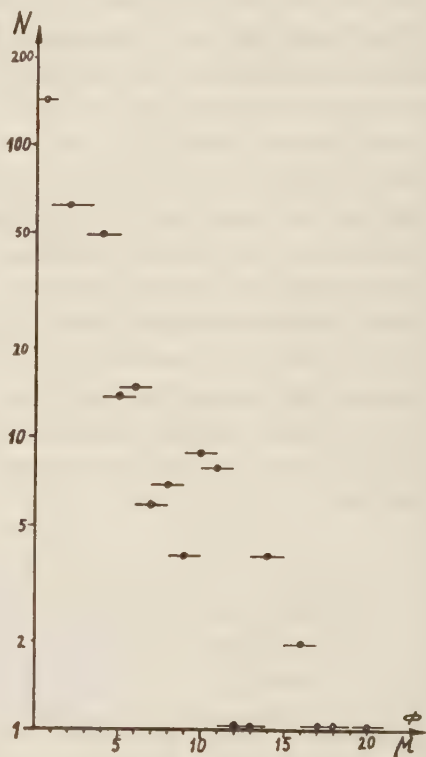


fig 4.3.2.1 Histogramme du nombre N de particules érodées en fonction de leur diamètre ϕ . Electrodes: Cu^+ , Ac^- , $\bar{\phi} \approx 3\text{M}$, $I_A = 32\text{A}$, $T_A = T_I = 25\text{ms}$, faible injection.

Placée dans un champ électrique d'au maximum 10 kV/cm, cette huile se met très brutalement en mouvement tourbillonnaire électrohydrodynamique {13}{14} . Nous avons observé un effet de polarité. Dès l'application du champ électrique, la contamination, entraînée par les tourbillons, se dépose en une couche compacte à la cathode, le diélectrique redevient clair, cf fig 4.3.2.2.

En inversant la polarité, le sens de rotation du tourbillon s'inverse, la contamination se détache légèrement de ce qui est devenu l'anode, fig 4.3.2.4 elle est ensuite peu à peu entraînée par le diélectrique vers la nouvelle cathode où elle s'accumule. fig 4.3.2.4.

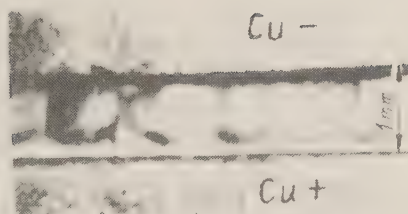


fig 4.3.2.2 Tourbillons électrohydrodynamiques avec accumulation de contamination à la cathode. (Contamination naturelle C_1 , $E = 10 \text{ kV/cm}$).

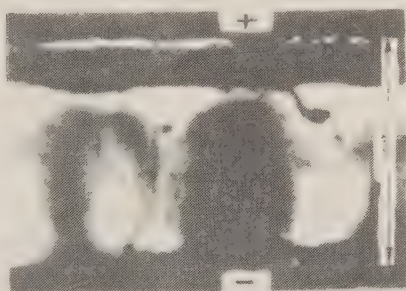


fig 4.3.2.3 Dès l'inversion de la polarité, la contamination se détache légèrement en bloc de la nouvelle anode. (Contamination naturelle C_1 , $E = 10 \text{ kV/cm}$).

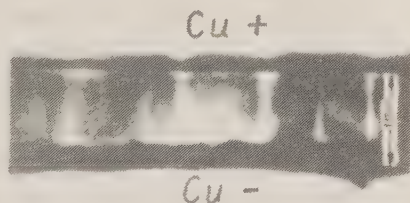


fig 4.3.2.4 Photographie prise après avoir inversé la polarité de la fig 4.3.2.2. Les tourbillons ont changé de sens de rotation et entraînent la contamination vers la nouvelle cathode (Contamination naturelle C_1 , $E = 10 \text{ kV/cm}$).

La contamination de l'eau par les décharges se fait essentiellement par le biais des particules métalliques érodées.

4.3.2.2 Analyse chimique de la contamination de l'huile :
un échantillon d'huile contaminée dans les mêmes conditions que précédemment (fig. 4.3.2.1) a été décanté, le résidu solide lavé avec de l'hexane sur un filtre millipore de 0,22 μ de porosité, puis analysé par oxydation à chaud.

Les pourcentages pondéraux des principaux constituants du produit de décantation sont :

- 16,1 % C probablement du carbone et un
- 1,5 % H solde d'huile
- 98 % oxyde de métaux (CuO , Fe_2O_3) et éventuellement des carbides..

(total plus grand que 100% vu l'oxygène introduit par cette méthode d'analyse!).

L'huile restante qui est un peu jaune, est analysée dans un premier temps par chromatographie en couche mince et comparée à de l'huile vierge: l'huile contaminée contient des aromates lourds que nous n'avons pas mis en évidence dans l'huile vierge. Les autres composants sont présents dans des proportions identiques pour les deux échantillons. Les paraffines des deux huiles ont ensuite été comparées entre elles par chromatographie en phase gazeuse: les différentes molécules qui les composent sont présentes dans la même proportion, nous n'avons pas détecté d'allongement ou de fractionnement de ces molécules.

4.3.2.3 Huile contaminée par les électrodes auxiliaires:
(c.f. 3.2.5.) Afin d'assurer une meilleure reproductibilité des mesures, nous avons standardisé la contamination à l'aide d'électrodes auxiliaires. Une injection ultérieure de ce liquide préalablement contaminé évite la présence dans le diélectrique de bulles de fumées qui pourraient influencer les mesures: directement si le claquage peut avoir lieu dans les gaz et indirectement en diminuant la quantité de diélectrique dans le gap ou encore en le mettant en mouvement comme nous le verrons par la suite.

CONTAMINATIONS NATURELLES STANDARDISEES									
Electrode auxiliaire	Cathode	Anode	I_A (A)	$\bar{I}$ (A)	T_A (us)	U_B (V)	débit re- cueilli ($\frac{ml}{min}$)	concentration volumique de métal	dénomina- tion stan- dardisée
fig 3.2.5.1	Ac	Cu	32	10	6	80	45,5	$1,4 \cdot 10^{-3}$	C1
fig 3.2.5.2	Ac	Cu	32	10	6	80	52	$1,1 \cdot 10^{-3}$	C2
fig 3.2.5.2	Ac	C	32	10	6	80	42,5	$3,3 \cdot 10^{-3}$	C3
fig 3.2.5.2	C	C	32	8,5	100	80	41	$7 \cdot 10^{-4}$	C4
fig 3.2.5.2	Cu	Cu	32	10	6	80	46	$5 \cdot 10^{-4}$	C5
fig 3.2.5.2	Ac	Cu	32	10	6	80	23	$2,5 \cdot 10^{-3}$	C6

4.3.2.4 Portée des particules émises durant

un arc. Nous avons mesuré la distance parcourue par les particules métalliques émises durant un arc dans une géométrie ouverte. Le dispositif expérimental est représenté sur la fig 4.3.2.5. Nous avons augmenté progressivement la hauteur h du diélectrique et ce jusqu'à ce que la majorité des particules éjectées durant les arcs ne traverse plus l'interface liquide gaz, ce qui nous donne un ordre de grandeur de la portée de ces projections. Cette dernière dépend de la puissance et de l'énergie des arcs. Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous.

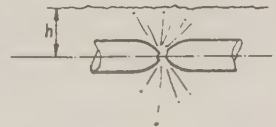


fig 4.3.2.5 Electrodes en géométrie ouverte permettant d'évaluer la portée des particules érodées par les arcs. L'anode est en cuivre, la cathode en acier.

DISTANCES MOYENNES L DE PROJECTIONS DES PARTICULES METALLIQUES ERODEES PAR DES ARCS DE DUREE T_A ET D' INTENSITE I_A			
T_A us	I_A A	T_I ms	L mm , remarques
1600	36	3,2	6
50	36	3,2	3
2	36	3,2	< 1 non mesurable
2	4	3,2	<< 1 non visible
50	4	3,2	< 1 non mesurable
1600	4	3,2	1 à 2
200	36	3,2	3 à 4 isoénergétique

4.3.3 CONTAMINATION ARTIFICIELLE

Il est difficile de séparer les divers constituants solides qui composent la contamination, pour déterminer l'influence relative de chacun d'eux sur les mesures. Nous avons donc fabriqué divers mélanges d'huile contaminée en y ajoutant du graphite naturel et des poudres métalliques de diverses granulométries et dans des proportions variables. Globalement, les résultats de mesures de délais d'amorçage avec de l'huile contaminée artificiellement sont comparables à tout point de vue à ceux obtenus avec une contamination naturelle. Ce procédé présente de nombreux avantages évidents et doit donc être utilisé le plus souvent possible.

Une observation microscopique de l'huile contaminée artificiellement montre toutefois quelques différences par rapport à la contamination naturelle.

- Les particules métalliques ne sont évidemment pas solidaires du graphite ce qui a probablement pour conséquence, les points suivants:
- L'effet de polarité décrit pour la contamination naturelle dans un champ électrique reste observable mais lors d'une inversion de polarité le graphite reste collé à ce qui était la cathode et seule les particules métalliques circulent dans le fluide. (fig 4.3.3.1)

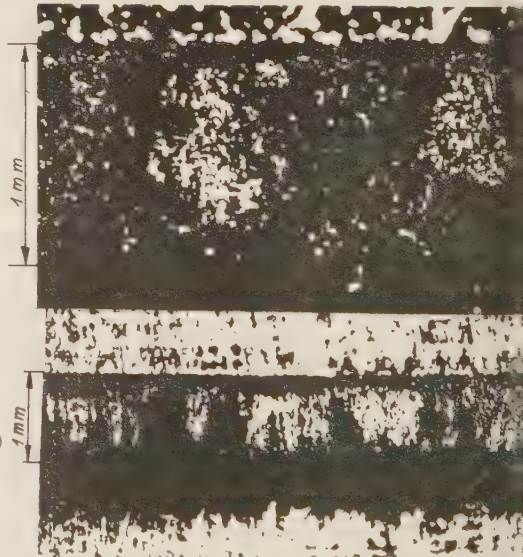


fig 4.3.3.1 Diélectrique contaminé artificiellement avec du graphite de Madagascar et des particules d'Al. Les 2 photos sont prises après avoir appliqué un courant instant 10kV/cm entre les électrodes. Le graphite s'est aggloméré sur la cathode alors que les particules Al restent en mouvement dans le gap.

- Le mouvement tourbillonnaire du fluide en cellules n'est visible qu'avant le collage du graphite.
(fig. 4.3.3.2).



fig 4.3.3.2 Tourbillons électrohydrodynamiques avec accumulation de contamination à la cathode. Contamination artificielle: 10 gr/l graphite de Madagascar ultra fin. $E = 10 \text{ kV/cm}$.

- La formation de ponts par alignements de particules est plus nette qu'avec la contamination naturelle, de même, le transport de charges par un mouvement de va-et-vient de particules ou d'alignements de particules est très facilement observable
fig. 4.3.3.3 Des temps de collage des particules sur les électrodes ("dwell time") plus ou moins longs sont observés.

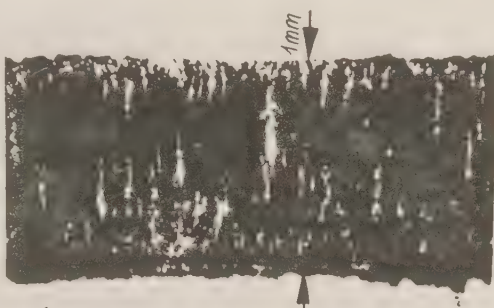


fig 4.3.3.3 Photographie prise après avoir interrompu un champ électrique de 10 kV/cm dans une huile contaminée avec une poudre de fer dans un rapport volumique égal à 10^{-1} .

La granulométrie exacte des constituants est actuellement encore mal connue. Différentes tentatives de mesures de cette dernière ont été tentées mais les résultats sont rarement concordants.

Les principaux ingrédients utilisés pour fabriquer la contamination artificielle sont donnés dans le tableau de la page suivante.

CONSTITUANTS DE LA CONTAMINATION ARTIFICIELLE			
Matière	$\pm$ moyen	$\pm$ maximum	forme des grains
Graphite naturel de Madagascar: Ultra-fin	55% < 2 μ	0,1% à 16 μ	?
Graphite de Bavière:moyen-fin	51% < 6 μ	0,2% à 40 μ	?
Fer	plus fin que le Ni ci-dessous		sphérique
Nickel	3 μ	env. 24 μ	sphérique
Al	5 μ	?	elliptique
Cu	50% < 7 μ	22 μ	pelliculaire
Farine de quartz	65 à 83% < 6 μ	2 à 10% > 10 μ	?

4.4 INFLUENCE DE LA CONTAMINATION SUR LES DELAIS D'AMORCAGE

4.4.1 INTRODUCTION, ordre de grandeurs.

Les mesures de ce paragraphe ont été faites en injectant un liquide préalablement contaminé (contamination naturelle ou artificielle) dans l'électrode cylindrique (c.f 3.2.3) ou dans l'électrode concentrique (c.f. 3.2.2) moyennant les injecteurs auxiliaires (c.f. 3.3.4).

La mesure de base est un histogramme des délais d'amorçage que ce l'ordinateur (fig 4.4.1.1). Nous choisissons alors à l'oeil 1 limites de la régression entre lesquelles il calcule le délai m τ et son écart standard. Cette valeur correspond au champ électrique E de la mesure définie par U_B/g . E est modifié en ajustant le gap, U_B est constant durant une mesure. {15}

Remarque:

L'écart standard calculé par l'ordinateur n'est valable que dans les limites de la régression. La dispersion des mesures reportées dans les diagrammes est une estimation qui tient compte des points lors des limites de cette régression. Cette dispersion n'est donc égale à l'écart standard calculé que lorsque la régression est faite sur tous les canaux de l'histogramme des délais.

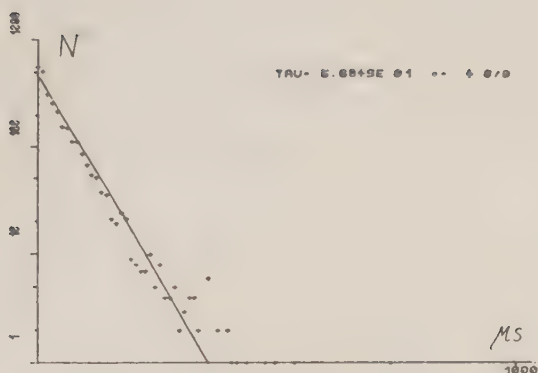


fig 4.4.1.1 Nombre N des décharges, en ordonnée en fonction du délai d'amorçage en abscisse (μ s). Mesuré dans de l'huile contaminée avec 0,08 gr/l de graphite de Madagascar ultra fin. $U_B = 250V$, gap = 30 μ .

Ces délais moyens sont ensuite reportés dans un diagramme $\log \tau = f(E)$.

Remarque: Nous verrons au paragraphe 4.5 que les délais moyens τ sont inversement proportionnels à la surface des électrodes. Afin de mieux pouvoir comparer les résultats obtenus avec des électrodes de différentes aires A nous reporterons

$$\log \tau \cdot A \left(\mu s \cdot cm^2 \right) = f(E) \quad (kV/cm)$$

fig 4.4.1.2

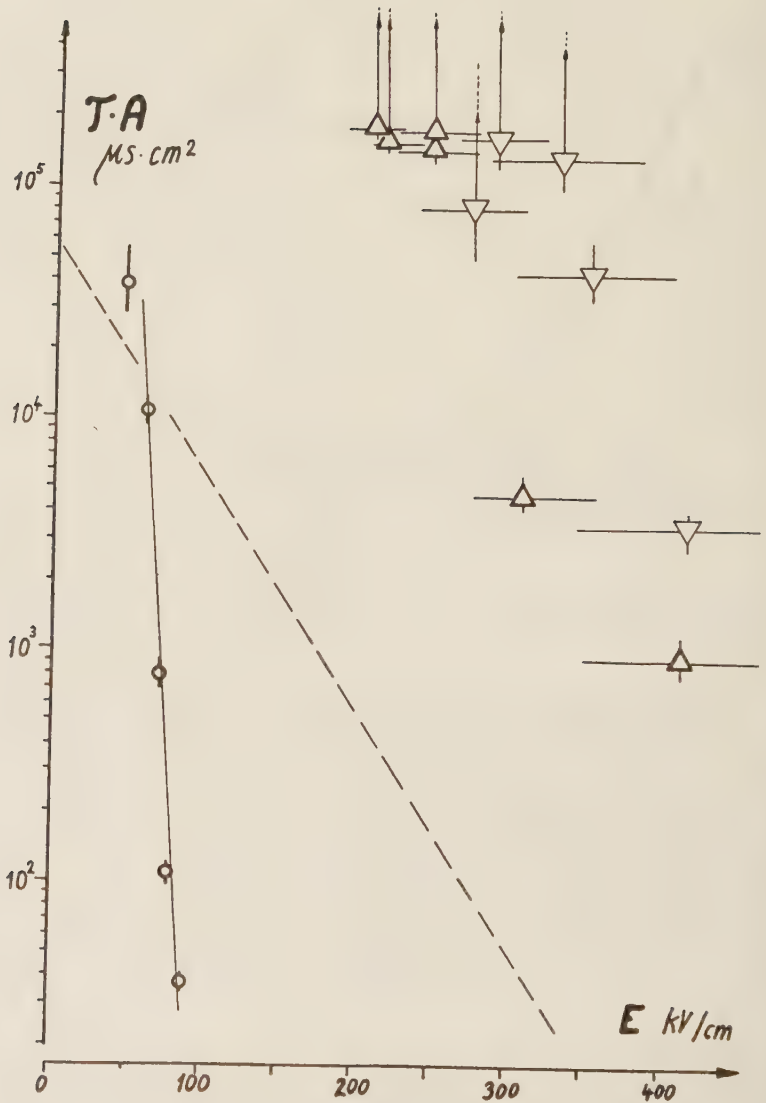


fig 4.4.1.2 La contamination du diélectrique facilite considérablement l'amorçage pour un champ électrique donné. $U_p = 250V$. huile contaminée C_2 . Δ et ∇ sont deux séries de mesures dans de l'huile vierge filtrée à $0,05 \mu$. La droite pointillée est le prolongement de mesures de Brignell et Metzmacher relevées à des champs de l'ordre du MV/cm , donc des délais moyens de l'ordre de $10^{-7} \mu s \cdot cm$ dans de l'n-hexane purifié.

Il n'est pas nécessaire d'insister sur l'influence énorme de la contamination. Ce sont les résidus solides dans l'huile contaminée qui sont responsables de la facilité d'amorçage: si l'on injecte une huile contaminée que l'on a préalablement

laissé décanter, les résultats tendent vers les délais moyens de l'huile propre que l'on atteint, si cette huile est filtrée. En mélangeant de l'huile vierge aux résidus de décantation et en injectant ce liquide, on retombe alors pratiquement sur les résultats de l'huile initialement contaminée.

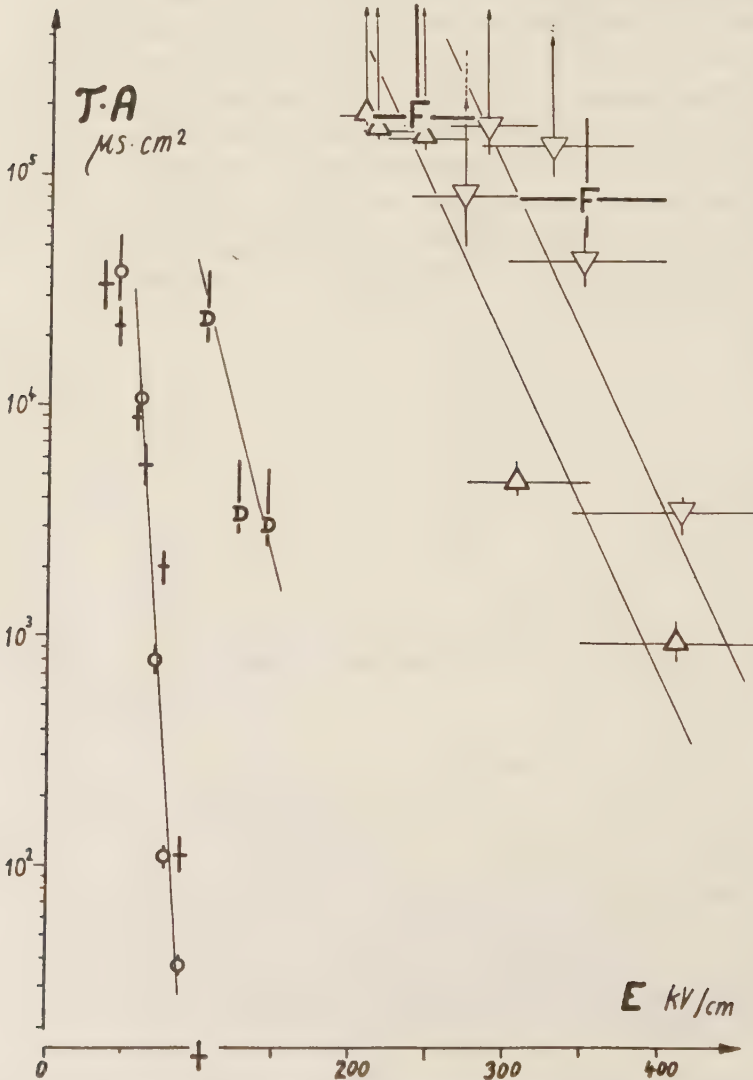


fig 4.4.1.4 Superposé à la figure 4.4.1.2: D huile contaminée avec C₂, décantée avant la mesure. F même huile mais filtrée à 0,05 μ, on retombe dans les mesures d'huile vierge filtrée. + résidus de C₂ décanté auxquels on a mélangé de l'huile vierge, on retombe sur les mesures initiales avec C₂.

4.4.2 INFLUENCE DE LA NATURE DU CONTAMINANT

Une série de mesures de délais moyens pour les diverses contaminations naturelles sont reportées en fonction du champ électrique sur la figure 4.4.2.1. A concentrations volumiques semblables, les résultats sont essentiellement semblables. Les différences

qui subsistent ne peuvent à priori pas être mises sur le compte de la nature du contaminant. Il est vrai que toutes ces huiles contiennent une assez grande proportion de graphite, mais ce dernier n'est pas le seul responsable de la facilité d'amorcer: en effet, on voit sur la fig 4.4.2.2 qu'une quantité de poudre de fer, par exemple, mélangée à de l'huile (donc sans graphite) donne également des résultats semblables. De même pour le

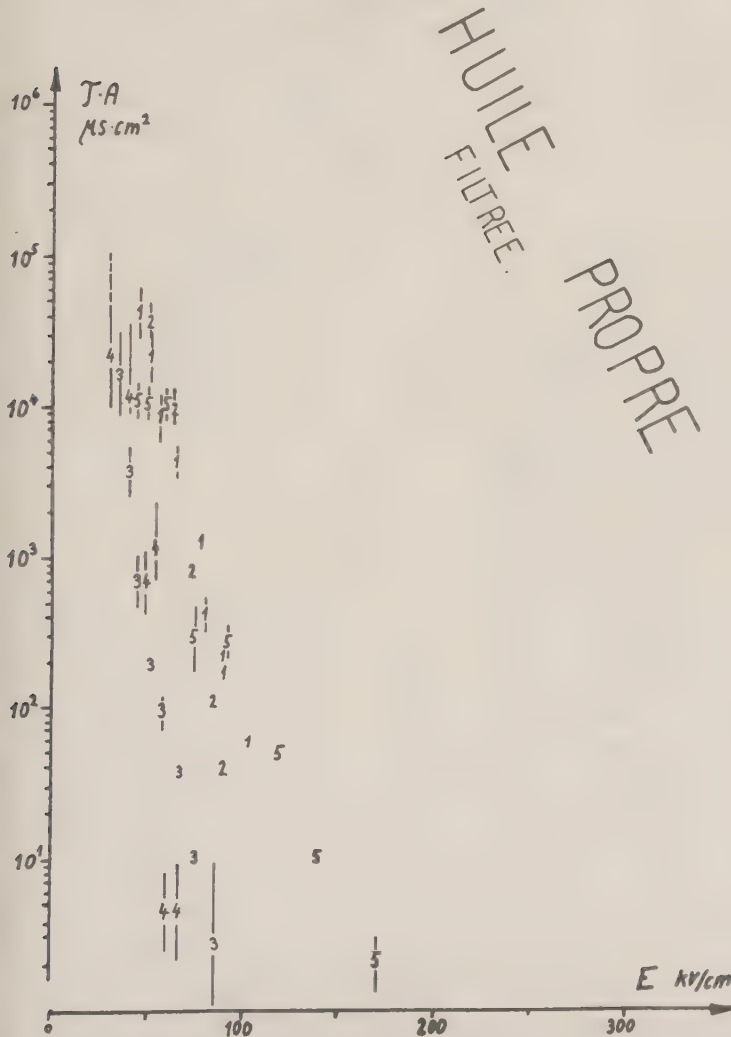


Fig 4.4.2.1 Mesures comparatives de la facilité d'amorcer dans de l'huile contenant divers contaminants naturels en quantités comparables. Les no 1 se réfèrent à contaminations naturelles Ci. $U_B = 250$ V.

graphite sans adjonction de particules métalliques.

Par contre, en insérant dans de l'huile une farine de silice, sans prendre de précautions particulières, les mesures correspondent environ aux résultats obtenus avec de l'huile propre décantée. Il faut donc que le contaminant soit conducteur pour faciliter l'amorçage.

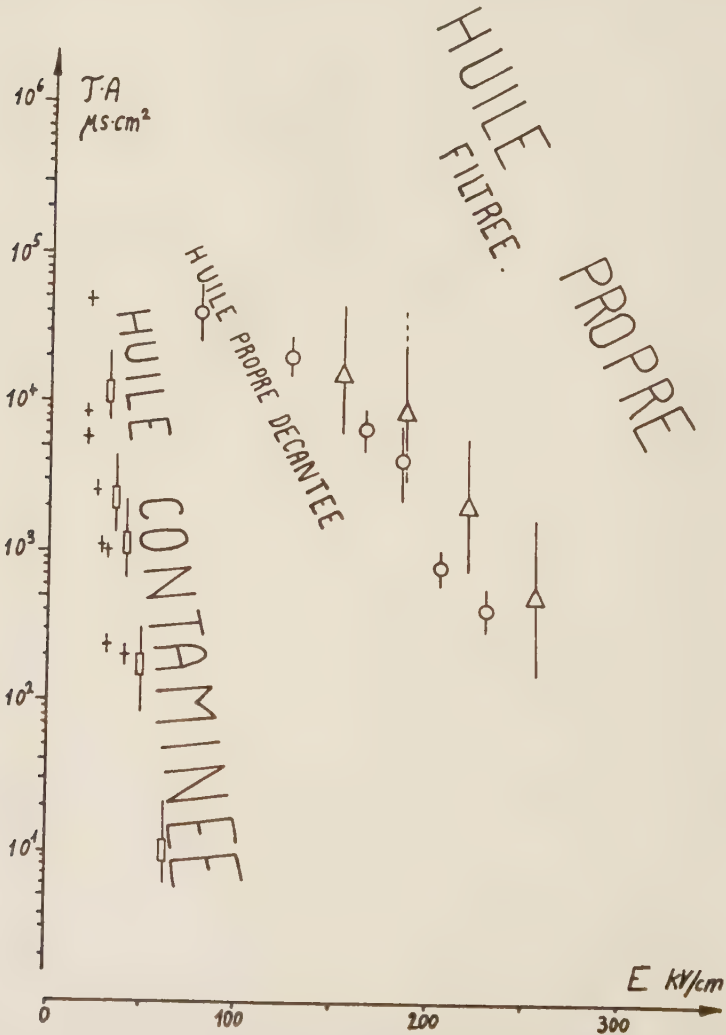


fig 4.4.2.2 Le graphite a typiquement la même influence que le fer sur les délais d'amorçage. Par contre une poudre de farine de silice ne diminue pas ces délais. $U_B = 250$ v.

$+$ fer , 2 gr/l,	concentration volumique: $0,25 \cdot 10^{-3}$
$\square$ graphite , 0,5 gr/l,	concentration volumique: $0,2 \cdot 10^{-3}$
Δ farine de quartz , 4 gr/l,	concentration volumique: $1,6 \cdot 10^{-3}$
$\circ$ farine de quartz , 0,4 gr/l,	concentration volumique: $0,16 \cdot 10^{-3}$

4.4.3 INFLUENCE DE LA GRANULOMETRIE

DU CONTAMINANT Il est difficile de connaître la granulométrie de poudres fines: les diverses tentatives faites pour la mesurer n'ont pas donné de résultats concordants dans la plage des diamètres qui nous intéressent c-à-dire

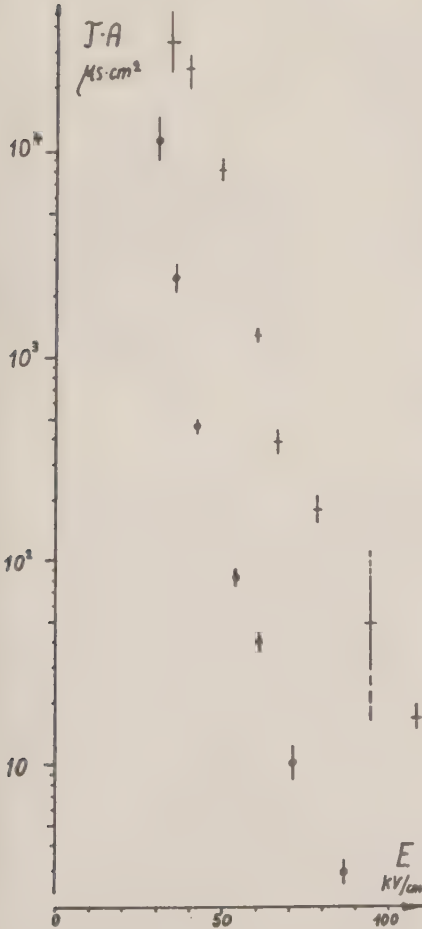


fig 4.4.3.2 Ces deux séries de mesures de délais moyens en fonction du champ électrique montrent l'influence de la granulométrie des particules du contaminant. Concentration volumique: $1,6 \cdot 10^{-4}$. $U_B = 250 V$.
 • graphite de Madagascar ultra-fin $\bar{\phi} = 2,9 \mu$
 + graphite Bavarois moyen-fin $\bar{\phi} = 6,7 \mu$

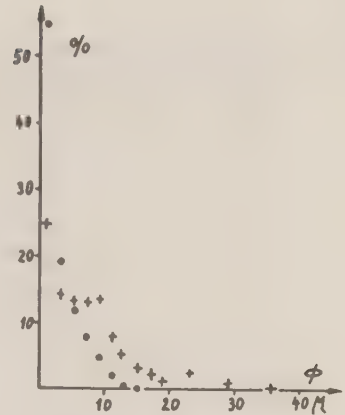


fig 4.4.3.1 Granulométrie de 2 qualités de graphite:
 • graphite de Madagascar ultra-fin $\bar{\phi} = 2,9 \mu$
 + graphite Bavarois moyen-fin $\bar{\phi} = 6,7 \mu$

entre quelques microns et quelques centièmes de microns. Les poudres métalliques que l'on trouve dans le commerce sont, dans les meilleurs cas, caractérisées par un diamètre moyen des grains, un diamètre maximum et une appréciation quant à la forme des grains. La séparation d'une poudre en plusieurs plages de diamètres n'est pas une chose aisée si l'on ne peut pas contrôler simplement et rapidement le résultat. Nous disposons toutefois de deux graphites de granulométries connues fig 4.4.3.1. Des mesures avec des concentrations volumiques identiques de ces deux contaminants ont donné des résultats différents, à savoir: des grains plus fins facilitent l'amorçage (fig 4.4.3.2). Voir également la fig 4.4.4.4.

4.4.4 INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DE CONTAMINANT

La figure précédente 4.4.1.4 qui montre la grande différence entre une huile filtrée et une huile fortement contaminée suggère également que les délais moyens sont fonction de la quantité de contaminant que contient le diélectrique, puisque les résultats d'une huile décantée non filtrée se situent entre ceux d'un diélectrique contaminé et ceux d'une huile filtrée. Cette constatation est confirmée par la simple mesure suivante: nous avons injecté de l'huile contaminée par l'électrode de contamination (fig 3.2.5.1) dans l'électrode concentrique décrite au paragraphe 3.2.2. La contamination du diélectrique injecté à débit constant

est fonction de la puissance dissipée dans l'électrode de contamination que nous avons largement variée. On constate sur la figure 4.4.4.1 que les délais moyens sont fonction de la concentration volumique de contaminant. Il est difficile de quantifier ce résultat, car dans cette mesure, les fumées produites lors de la contamination du diélectrique sont évidemment également injectées dans l'électrode de mesure, ce qui modifie beaucoup de paramètres de mesure, en plus de l'apport de grandes quantités de gaz en expansion dans le gap de mesure. Cet inconvénient peut être neutralisé en injectant un diélectrique préalablement contaminé (contamination naturelle ou artificielle) que l'on injecte par la suite plus ou moins dilué. Le résultat de ces mesures donne les droites de la figure 4.4.4.2 et 4.4.4.3 pour respectivement une contamination naturelle (C1) et artificielle (deux qualités de graphite).

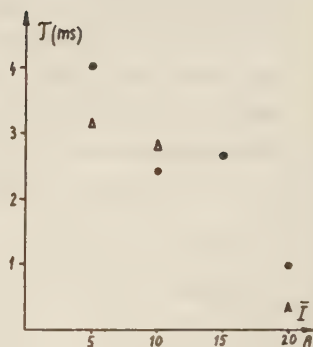


fig 4.4.4.1 Deux séries de mesures de délais moyens d'amorçage $\bar{T}$ en fonction du courant moyen de contamination $\bar{I}$ pour une injection d'huile propre constante. L'huile contaminée par des décharges de $T_A = 25 \mu s$ en variant le courant d'arc I_A . Le gap de l'électrode de contamination est asservi, U_B contamination = 80 V. Le gap de mesure = 20 μ , U_B mesure = 250 V. T_A mesure = 1,8 μs , I_A mesure = 1 A.

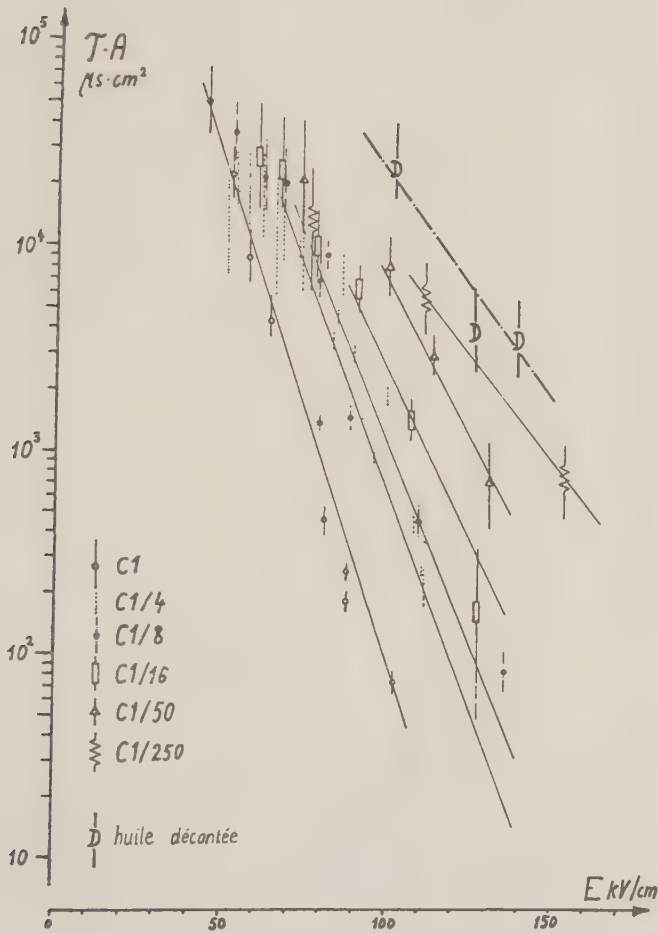


fig 4.4.4.2 Délais d'amorçage en fonction du champ électrique pour différentes dilutions d'huile contaminée naturellement C₁.
 $U_B = 250 \text{ V}$.

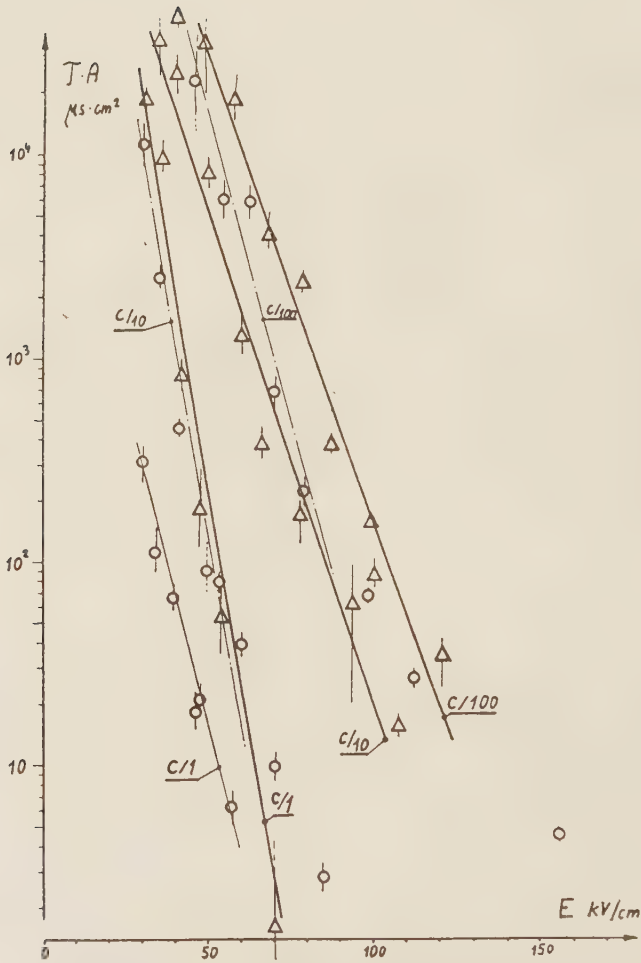


fig 4.4.4.3 Délais d'amorçage en fonction du champ électrique pour différentes concentrations volumiques C de graphite dans de l'huile. $U_B = 250$ V. $C = 1,6 \cdot 10^{-3}$. O: graphite de Madagascar ultra-fin. Δ : graphite Bavaois moyen-fin.

Une coupe verticale, à champ électrique constant, des deux graphiques précédents est reportée à la figure 4.4.4.4.

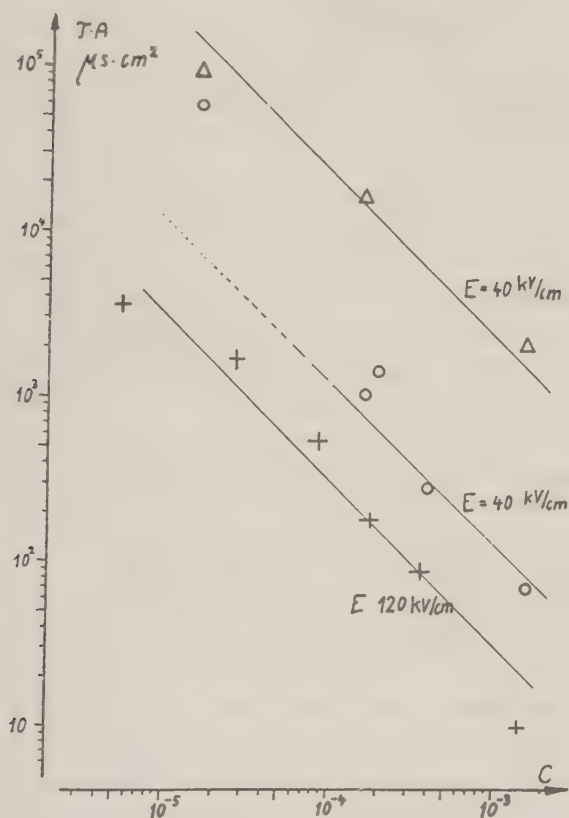


fig 4.4.4.4 Délais d'amorçage en fonction de la concentration volumique de différents contaminants, reportés à champ électrique constant.

Les délais d'amorçage sont en première approximation inversement proportionnels à la concentration volumique de contaminant. Le décalage vertical des droites relevées pour le graphite est attribué aux diverses granulométries.

+ C₁, E = 120 kV/cm. O graphite de Madagascar ultra-fin, E = 40 kV/cm. Δ graphite Bavarois moyen-fin, E = 40 kV/cm.

Il en ressort que le délai d'amorçage est grossièrement inversement proportionnel à la concentration volumique de contaminant.

Pour une granulométrie du contaminant et une configuration des électrodes données, en maintenant U_B et g constants, on peut écrire :

$$\tau \cdot C = \text{constante}$$

4.4.4.5

où τ est le délai statistique moyen et C la concentration volumique de contaminant.

C'est une première approximation que la dispersion des "droites" des figures 4.4.4.2 et 4.4.4.3 ne permet pas d'améliorer avec une grande certitude. Elle n'est certainement pas trop mauvaise dans une plage limitée de concentration. L'exposant de la concentration volumique C dans la formule 4.4.4.5 aurait tendance à être plus petit que -1 (entre -1 et -2). Ceci pourrait être expliqué par la surface des particules de la contamination qui s'ajouterait à la surface des électrodes comme le propose le modèle exposé au chapitre 5.

4.4.5 STABILITE TEMPORELLE DE LA CONTAMINATION

4.4.5.1 Introduction Dans les mesures du paragraphe 4.4 nous avons implicitement admis que la contamination n'est pas fonction du temps car nous avons utilisé des diélectriques contaminés naturellement plusieurs jours auparavant. Si cette supposition n'était pas exacte, les résultats précités ne seraient pas remis en cause pour autant puisque la durée d'une mesure est très courte (une fraction de seconde) par rapport à une hypothétique constante de temps de la contamination, il en est de même pour l'intervalle de temps entre deux mesures comparatives, au maximum de quelques minutes, durée qui ne permettrait pas à l'huile contaminée de vieillir beaucoup, à moins que ces minutes ne soient placées trop près de la création de ce diélectrique. En d'autres termes, toutes les mesures évoquées précédemment sont faites en un temps beaucoup plus court que l'âge du diélectrique contaminé. Notons que nous négligeons la contamination des décharges de mesures très peu énergétiques.

Nous aimerions savoir si un diélectrique contaminé naturellement vieillit, c'est-à-dire savoir si la facilité d'amorçage change au cours du temps. La mesure idéale permettant de répondre à cette question consiste à relever le délai moyen d'amorçage dans un champ électrique macroscopique homogène, donc avec une électrode d'une certaine étendue, dans laquelle il y a partout un diélectrique fortement contaminé. Cette contamination doit se faire sur toute l'aire de mesure simultanément pour pouvoir définir avec précision un "temps zéro", naissance de la contamination, à partir duquel on étudie son évolution, son vieillissement. Nous allons scinder cette mesure idéale en deux plages de temps, d'une part les temps courts, diélectriques fraîchement contaminés, d'autre part les temps longs, vieux diélectriques.

4.4.5.2 Courte constante de temps de vie de la contamination

Elle ne peut se déterminer par la mesure idéale décrite précédemment pour plusieurs raisons:

- Une mesure de délai moyen τ prend un temps fini non négligeable par rapport aux durées que l'on aimerait mesurer.
- La définition du "temps zéro" d'une forte contamination sur une grande surface est peu précise.

Ce sont ces contradictions qui nous ont forcés à développer l'électrode concentrique 3.2.2. {16}. La symétrie axiale et la réduction des aires des électrodes proches de l'axe qui en découle permettent de mesurer la facilité d'amorçage de diélectriques dont l'âge est défini par la formule 3.2.2.5. Les débits vont jusqu'à 100 ml/min pour un gap de 80 μ et le plus petit rayon est inférieur à 1 mm donc les temps de vieillissement les plus courts détectables sont de l'ordre de 10^{-4} s. Afin de réduire le temps propre de la mesure, nous n'avons pas relevé les délais d'amorçage mais les tensions de claquage U_B fournies par le générateur très haute tension 3.3.3.2 puis moyennées pour chaque rayon r_i . La tension était appliquée successivement

sur toutes les électrodes (tous les rayons r_i donc tous temps Δt_i) mais dans un ordre quelconque afin d'éviter une éventuelle corrélation avec la contamination des décharges de mesures. Il a été difficile d'obtenir une usure régulière des électrodes de contamination donc une concentration de contamination constante régulière avec de grands débits de diélectrique. Les temps pratiquement mesurables sont donc ramenés à environ 1 ms. Un résultat typique de ces mesures est représenté à la figure 4.4.5.1 (voir également fig 4.5.2.1)

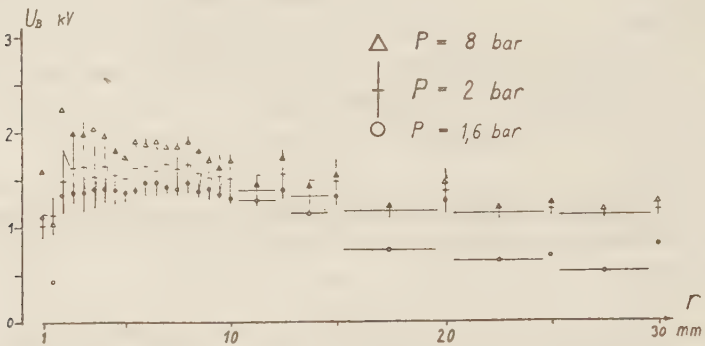


fig 4.4.5.1 3 mesures des tensions moyennes de claquage U_B en fonction du rayon r de l'électrode de mesure donc en fonction du temps, de l'âge de la contamination. L'échelle des temps est modifiée par les différents débits du diélectrique. La position du maximum de U_B n'est pas influencée par le débit, elle est donc indépendante du temps, donc du vieillissement de l'huile.

P = pression d'injection du diélectrique. Pour les trois mesures, l'huile est contaminée par des arcs de 12,5 A, de durée $T_A = 6$ μ s, le courant moyen de contamination est de 3 A. Les électrodes de contamination sont respectivement un capillaire de cuivre (anode) opposé à une tige d'acier (cathode). Pour plus de clarté, seule la mesure avec $P = 2$ bar est représentée avec la dispersion des tensions de claquage. La mesure est faite avec le voltmètre de pointe 3.4.1.5, en série avec un échantillonneur 3.4.1.2 et l'ADC 3.4.1.3.

On voit que la moyenne des tensions de claquage U_B passe par un maximum au cours du temps. S'il existait une constante de temps courte de la contamination, la moyenne des U_B devrait tendre asymptotiquement vers une valeur maximum en fonction du temps, valeur correspondant au délai d'amorçage de la même huile mais vieillie. De plus un changement du débit devrait changer l'échelle horizontale de la figure 4.4.5.1. ce que nous n'avons jamais observé.

La forme du résultat n'est donc pas fonction du temps, il n'y a donc pas de constante de temps de la contamination comprise entre 1 ms environ et environ 1 minute, ce que permet de mesurer l'électrode concentrique.

Il reste à expliquer la forme du résultat de la fig 4.4.5.1: d'une part la distance constante d'environ 2 mm, portée dans laquelle l'amorçage est facilité, d'autre part la diminution des tensions de claquage pour les grands rayons de l'électrode de mesure. Cette dernière diminution trouvera son explication de deux manières complémentaires:

- 1) l'augmentation de la surface "A" des électrodes de mesures pour les grands rayons (voir paragraphe 4.5).
- 2) la diminution de la vitesse d'écoulement du diélectrique (voir paragraphe 4.6).

Notons qu'à l'époque où nous avons fait ces mesures, nous ignorions l'influence de l'aire A des électrodes et de la vitesse du diélectrique. Ce n'est pas, comme nous le pensions initialement, l'accumulation de la contamination des décharges de mesures qui est responsable de cette diminution, car elle n'est pas fonction du débit du diélectrique, même sans injection, le phénomène persiste pour les grands rayons.

Nous n'avons pas élucidé de manière convaincante les faibles tensions de claquages pour les électrodes de petits rayons. La vitesse du diélectrique pourrait également éclaircir ce problème (voir paragraphe 4.6 pour les très grandes vitesses d'écoulement du diélectrique). Il existe une autre corrélation possible qui pourrait expliquer éventuellement cet aspect des mesures: la portée initiale des particules incandescentes émises par les électrodes de contamination (voir paragraphe 4.3.2.4).

Une confirmation de l'absence de constante de temps courte caractérisant la contamination naturelle est fournie par les distributions spatiales de décharges: en effet, si par l'absurde, cette dépendance du temps existait, il serait impos-

sible de relever des répartitions aléatoires des décharges, alors que ces dernières s'obtiennent facilement avec des T_I de l'ordre de la milliseconde ce qui représente la limite courte à partir de laquelle il n'y a pas de constante de temps de la contamination. En dessous de cette valeur de l'ordre de la milliseconde, il existe un effet de mémoire de la contamination qui peut être mis en évidence de la manière suivante: on contamine le diélectrique entre les électrodes X-Y avec un taux de répétition des arcs relativement élevé, donc un temps d'intervalle entre deux décharges consécutives relativement court: T_I court simultanément on relève la distribution spatiale des décharges. De temps en temps, on interrompt les décharges en intercalant un T_I long mais suffisamment rarement pour ne pas modifier la contamination macroscopique moyenne du diélectrique (fig 4.4.5.2)

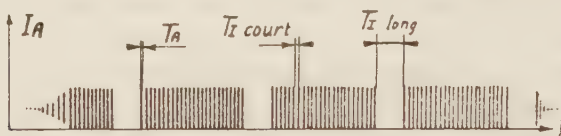


fig 4.4.5.2 Courant d'arc I_A en fonction du temps

On enregistre séparément la distribution spatiale des arcs précédés par un T_I long, que l'on compare ensuite à la distribution spatiale de toutes les décharges en le rapportant à cette dernière: fig 4.4.5.3. On constate que la distribution spatiale des T_I courts est plus localisée dans une zone de quelques millimètres. La dimension de cette zone est fonction des T_I . Cette localisation mesure la plus grande facilité d'amorcer dans le voisinage immédiat d'une décharge un court instant après qu'elle ait éclaté. Elle est indépendante des distributions spatiales mesurées, ces dernières peuvent être localisées ou aléatoires.

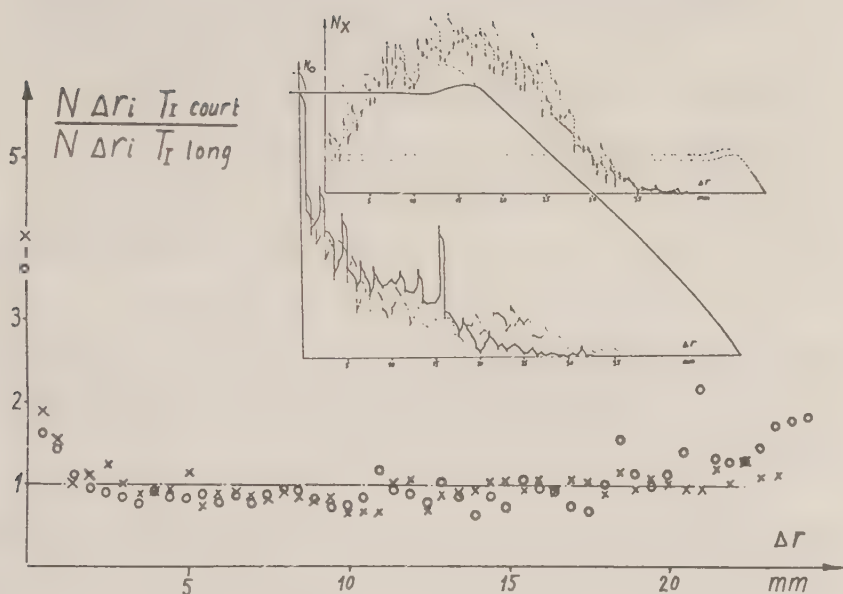


fig 4.4.5.3 Distribution spatiale mesurée avec T_I court rapportée à la distribution spatiale mesurée simultanément avec T_I long. Ce résultat est remarquablement indépendant des conditions de mesures: on voit dans le haut de la figure les distributions pour lesquelles nous avons reporté le résultat, l'une est fortement localisée, N_0 , l'autre est pratiquement aléatoire, N_X .
 $T_A = 25 \mu s$, $T_I \text{ court} = 25 \mu s$, $I_A = 25 A$, $T_I \text{ long} = 3200 \mu s$, gap asservi autour de 35μ 0 avec injection de diélectrique propre, usinage localisé. X sans injection, répartition aléatoire.

Cette constatation n'implique pas forcément l'existence d'une constante de temps courte: il s'agit probablement d'une inhomogénéité locale de la concentration de contamination qui durant le T_I long diffuse et disparaît dans la contamination moyenne, ou d'une inhomogénéité thermique dans le gap, ce qui n'entre pas dans notre définition de la contamination car il n'y a pas équilibre avec le milieu environnant: la concentration locale de contaminant et la température locale sont des paramètres de mesures.

4.4.5.3 Longue constante de temps de vie de la contamination

Cette mesure, par opposition à la précédente est très facile à mettre en évidence: on recueille du diélectrique contaminé naturellement. De temps en temps, on l'injecte dans une électrode de mesure, après l'avoir agité pour compenser la décantation (ultra-son) et l'on relève chaque fois le délai moyen d'amorçage. Nous n'avons pas constaté de modification systématique de ce dernier en fonction du vieillissement de l'huile et ce, pour des durées comprises entre quelques minutes et une dizaine de jours.

Nous n'avons donc pas détecté de vieillissement de durée de vie de la contamination entre environ 1 ms et 10 jours. Ce résultat n'est pas trop surprenant dans la mesure où la contamination est formée de particules solides.

Relevons qu'une même mesure faite à des instants très différents ne donne pas toujours des résultats identiques malgré un contrôle sévère de tous les paramètres que nous connaissons actuellement et ceci indépendamment de l'âge du diélectrique.

4.5 DELAI D'AMORCAGE EN FONCTION DE LA GEOMETRIE DES ELECTRODES.

4.5.1 INTRODUCTION La diminution des tensions moyennes de claquage, constatée à la fig 4.4.5.1 pour les grands rayons de l'électrode concentrique alors que la concentration du contaminant est indépendante du rayon de l'électrode et que, comme nous venons de le voir, son action n'est pas fonction du temps, nécessite l'introduction d'un nouveau paramètre de mesure. Avec la symétrie axiale des électrodes concentriques il y a trois grandeurs physiques qui sont directement dépendantes du rayon de l'électrode de mesure:

- La géométrie de l'espace dans laquelle se déroule la mesure (aire de l'électrode, volume du diélectrique soumis au champ électrique). [17]
- La pression hydrostatique du diélectrique en mouvement.
- La vitesse moyenne du diélectrique puisque la section du canal d'écoulement n'est pas constante.

4.5.2 TECHNIQUE DE MESURE

4.5.2.1 Montage expérimental . Comme nous n'avons pas détecté de constante de temps de l'effet de la contamination, nous pouvons injecter dans l'électrode concentrique un diélectrique contaminé artificiellement, ou injecter une "vieille" huile contaminée par électroérosion. Comme précédemment nous utilisons pour cet usage les circuits diélectriques auxiliaires décrits au paragraphe 3.3.4. Pour la même raison, nous ne mesurerons plus des tensions de claquage fournies par le générateur très haute tension 3.3.3.2 mais nous utiliserons le convertisseur temps 3.4.1.1 et relevons des délais d'amorçage pour chaque rayon de l'électrode concentrique, moyennant l'interface 3.2.2.2. Sauf contre indication, les mesures sont relevées avec l'alimentation haute tension 3.3.3.1 à 250 V, sans générateur de puissance en parallèle. Le courant d'arc des décharges de mesures est donc limité à 1 A, T_A est inférieur à 2 μ s pour limiter la contamination des décharges de mesures.

4.5.2.2 Traitement des données. Les délais des 29 différents rayons de mesure sont stockés séparément dans la mémoire centrale. En tout, on enregistre 2900 délais par mesure. Les divers rayons sont mis successivement sous tension dans un ordre tel que deux décharges de mesure consécutives soient géométriquement éloignées l'une de l'autre. Les mesures peuvent être enregistrées puis groupées pour améliorer la statistique du résultat. Après une mesure, l'ordinateur calcule pour chaque rayon la régression linéaire donnant le délai moyen τ . Les limites de la régression peuvent en tout

être modifiées en fonction de l'appréciation de l'opérateur. Après ce traitement, l'ordinateur trace le délai moyen τ pour chaque rayon. fig 4.5.2.1

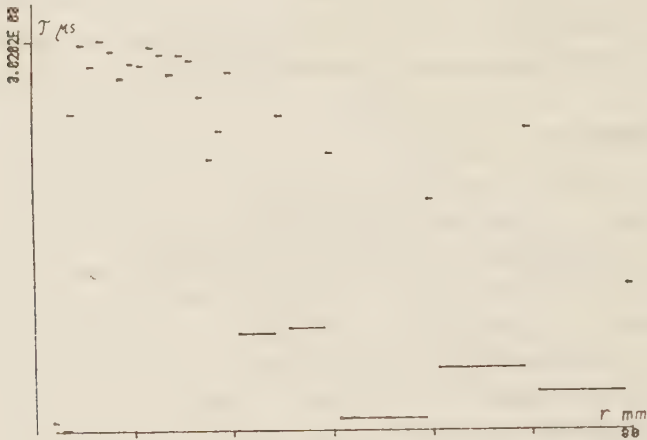


fig 4.5.2.1 Mesure de délai moyen τ pour les différents rayons r de l'électrode concentrique à haute résolution (3.2.2.3 no 1). On retrouve les faibles délais proches de l'axe de l'électrode et la diminution des délais pour les grands rayons, comme sur la fig 4.4.5.1. On voit clairement l'influence de la géométrie (surface ?) des électrodes. La longueur du trait représente la largeur de la couronne de l'électrode de mesure. U_b mesure 250V gap 30 μ . L'huile injectée est contaminée naturellement par électroérosion du capillaire central (c.f. 4.4.5.1). Les échelles du graphique sont linéaires.

La figure 4.5.2.1 permet d'identifier le paramètre principalement responsable de la diminution des délais pour les grands rayons: c'est l'influence géométrique qui l'explique puisque pour les électrodes étroites la diminution de τ est bien moins sensible. Par géométrie, nous entendons l'espace dans lequel le champ induit un claquage. Cet espace est lui-même défini par la surface des électrodes et par le gap qui caractérisent ensemble un volume. Nous avons déplacé le problème: quel est maintenant la grandeur physique à prendre comme paramètre ? surface ou volume ? Rien ne permet d'exclure définitivement le volume, mais nous n'imaginons pas de quelle manière ce dernier pourrait agir. Il reste la surface, d'autres chercheurs ont remarqué qu'elle intervient dans les mesures de délai d'amorçage dans des diélectriques hautement purifiés.

Postulons que le délai moyen d'amorçage est inversement proportionnel à la surface des électrodes (Aire A qui délimite le champ homogène) si l'on maintient constant les autres paramètres connus.

Afin de vérifier facilement cette hypothèse le programme nous donne le résultat sous une forme différente: d'une part il trace τ en fonction de $1/A$, ces points devraient s'aligner sur une droite passant par l'origine du graphique. D'autre part, il reporte $\tau \cdot A$ en fonction du rayon. Sous cette forme, le résultat devrait être indépendant du rayon. Pour améliorer la statistique des régressions, nous limiterons le nombre des électrodes de mesures tout en augmentant le nombre de décharges de mesure par électrode. Nous utiliserons également l'électrode de mesure no 2 de la figure 3.2.2.3 dont les surfaces varient entre 3,9 et 2216 mm².

4.5.3 DELAI MOYEN D'AMORCAGE INVERSEMENT PROPORTIONNEL A LA SURFACE A DES ELECTRODES. Nous présentons ci-après différents tests de l'hypothèse précédente. Le premier, fig 4.5.3.1, est une mesure de contamination naturelle directement injectée dans l'électrode de mesure. Nous avons simultanément surveillé la régularité de la production de diélectrique contaminé. Quand cette dernière condition est remplie, l'hypothèse $\tau \propto A^{-1}$ est assez bien vérifiée.

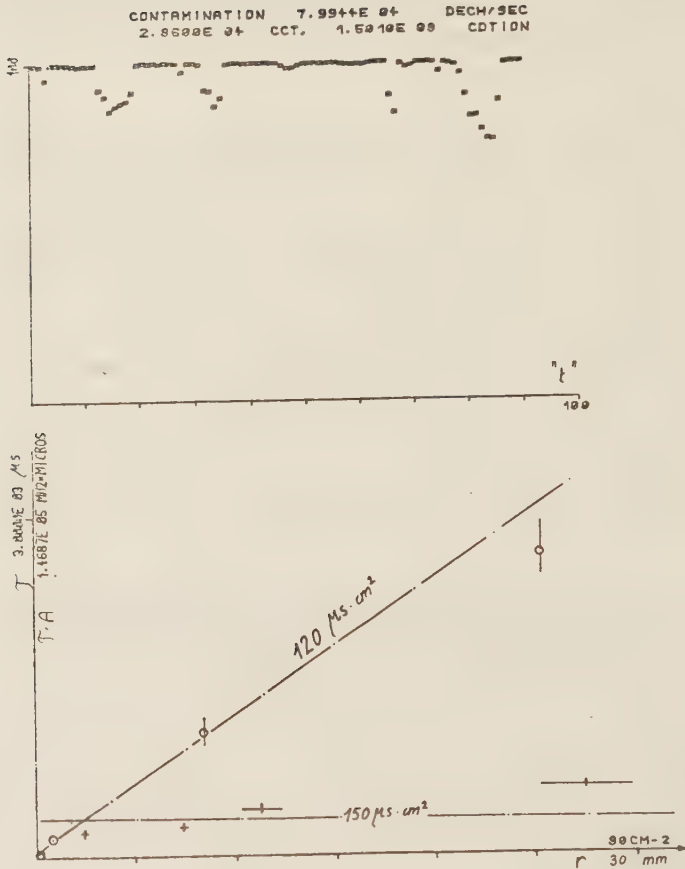


fig 4.5.3.1 o Délais moyens τ (μ s) en fonction de $1/A$ (cm^{-2})
+ $\tau \cdot A$ ($\mu\text{s} \cdot \text{mm}^2$) en fonction de r (mm)
La mesure se fait avec $U_B = 250$ V, gap = 20 μ , sur les électrodes n° 4, 14, 20, 28. (Les traits mixtes ont été tracés après coup).
□ Pourcentage des "bons" arcs de contamination en fonction du temps: $100 \times \text{nombre "bons" arcs} / \text{nombre total des décharges de contamination}$.
Le nombre total des décharges est égal à la somme des courts-circuits, "bons" arcs ($15 \text{ V} < U_A < 35 \text{ V}$), et des amorçages signalés alors que la tension de claquage U_B contamination = 80 V n'est pas atteinte (conduction). Ces trois nombres sont mémorisés dans l'échelle de comptage multiple (3.4.1.4), l'ordinateur les lit toutes les 30 décharges de mesures, c'est-à-dire 10 fois par seconde. Contamination avec $T_A = T_I = 4$ μ s, $I_A = 36$ A, courant moyen de contamination: 15 A, débit D de diélectrique: 7,5 ml/min.

La mesure représentée à la figure 4.5.3.2 est faite avec une contamination naturelle de même que ...

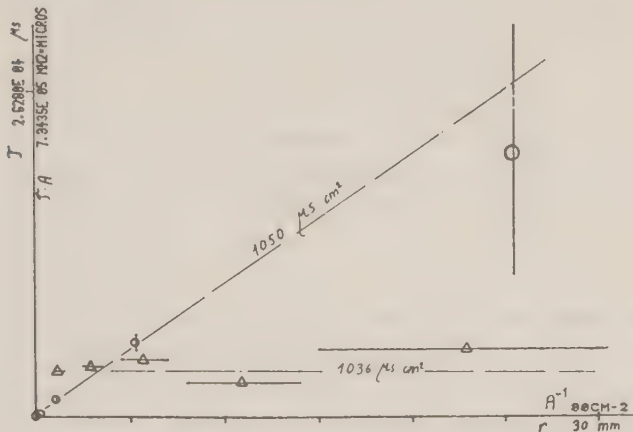


fig 4.5.3.2 ○: Délais moyens d'amorçage τ μ s en fonction de A^{-1} (cm^{-2}), Δ : $\tau \cdot A$ ($\mu\text{s} \cdot \text{mm}^{-2}$) en fonction du rayon r (mm). $U_B = 250$ V, gap 70 μ , diélectrique contaminé par 1 gr/l de graphite de Madagascar ultra-fin. La mesure est relevée avec l'électrode 3.2.2.3 no 2.

... la figure 4.5.3.3 qui est relevée sous une plus faible tension d'amorçage.

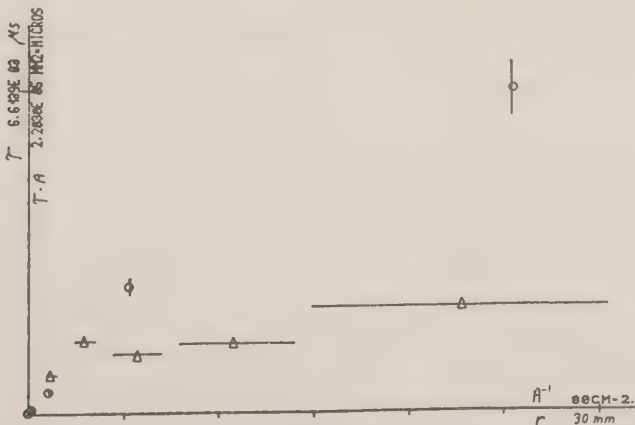


fig 4.5.3.3 ○: Délais d'amorçage en fonction de A^{-1} (cm^{-2})
 Δ $\tau \cdot A$ ($\mu\text{s} \cdot \text{mm}^{-2}$) en fonction du rayon r (mm). $U_B = 80$ V, gap 22 μ
 $I_{\text{A mesure}} = 4$ A, pour un diélectrique contaminé par 0,2 gr/l de graphite de Madagascar ultra-fin.

Ces deux dernières mesures confirment également que le délai moyen d'amorçage τ est inversement proportionnel à la surface A des électrodes.

Finalement, en respectant les conditions expérimentales de validité de la formule 4.4.4.5 (page 102) et compte-tenu de cette dernière, on peut écrire :

$$\tau \cdot A \cdot C = \text{constante} \quad 4.5.3.4$$

(où τ est le délai moyen d'amorçage, A la surface des électrodes qui délimitent le champ homogène et C la concentration volumique d'un contaminant de granulométrie bien définie).

La précision de la formule précédente est appréciable sur les graphiques des mesures. Ces dernières ont été relevées avec un débit non nul du diélectrique contaminé, afin d'éviter l'accumulation de la contamination des décharges de mesures. Ce mouvement du diélectrique influence le résultat comme nous le verrons au paragraphe suivant.

4.6 MODIFICATION DES DELAIS MOYENS D'AMORCAGE PAR LE MOUVEMENT RELATIF DU DIELECTRIQUE PAR RAPPORT AUX ELECTRODES

4.6.1 INTRODUCTION

Lors des mesures avec les électrodes concentriques, nous avons constaté que les histogrammes des délais d'amorçage, reportés sur papier semi-logarithmique n'étaient plus linéaires: il apparaît un maximum dans la courbe, c'est-à-dire un délai d'amorçage préférentiel avant lequel l'amorçage est improbable. fig 4.6.1.1

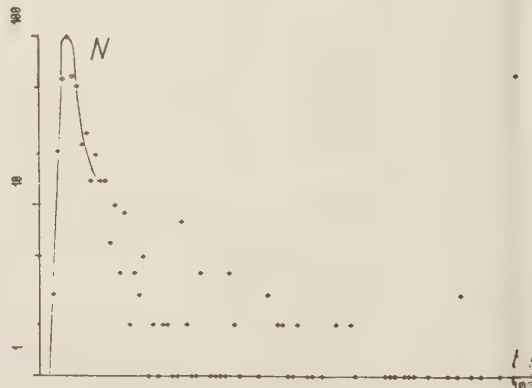


fig 4.6.1.1 Nombre N de décharges de délai d'amorçage t avec forte injection de diélectrique. Il apparaît un délai préférentiel. Mesuré avec l'électrode concentrique à surface constante fig. 3.2.2.3 no 9 sur l'anneau extérieur no 9. $U_B = 80$ V, $I_A = 4$ A, gap = 35 μ , D = 35 ml/min d'huile contaminée avec 1 gr/l de graphite de Madagascar ultra-fin.

Cette anomalie disparaît lorsque l'on coupe l'injection du diélectrique, elle est détectable directement à l'oscilloscope, au moment de l'enclenchement ou du déclenchement de la pression d'injection du diélectrique, elle n'est pas toujours simultanément présente pour tous les rayons de mesure. Suite à cette observation, nous avons construit une électrode concentrique de 10 plaques de mesure, d'égale surface, pour éliminer une éventuelle influence géométrique. La figure précédente nous montre que l'"anomalie" persiste. Toutefois, cette électrode se prête mal à une étude de l'influence de la vitesse du diélectrique pour deux raisons:

- 1) la vitesse d'écoulement du diélectrique est inversement proportionnelle au rayon de l'électrode de mesure, elle change donc beaucoup, près de l'axe de l'électrode, mais ces grandes variations sont moyennées par la première électrode de mesure qui, ayant la même surface que les électrodes extérieures, doit nécessairement s'étendre sur un grand rayon. {18} {19} {20}
- 2) la vitesse change en fonction du rayon de l'électrode mais il en est de même de la pression, ces deux variables ne sont pas indépendantes.

Ces deux inconvénients nous ont poussés à développer les électrodes P-V (3.2.4).

Précédemment, les histogrammes des délais étaient purement exponentiels: $N(t) = N_0 \exp(-t/\tau)$. Nous tirions d'une mesure le délai moyen d'amorçage τ . Puisque ce n'est plus le cas, il nous faut introduire un paramètre supplémentaire pour définir une mesure. Pour l'étude qualitative de ces nouvelles distributions des délais d'amorçage, nous avons naturellement choisi comme second paramètre le délai d'amorçage le plus fréquent que nous appellerons τ_f . Le délai d'amorçage moyen tiré de la régression linéaire calculée à partir de temps plus grands que τ_f sera appelé τ_{exp} fig 4.6.1.2

Dans les cas où τ_f est petit par rapport à τ_{exp} , ce dernier correspond aux délais moyens τ dont nous avons parlé jusqu'à ce jour. Les dispersions des τ_f reportées sur les graphiques des pages suivantes sont définies par les valeurs limites possibles de τ_f . Il s'agit d'une estimation. La remarque du paragraphe 4.4.1 concernant la dispersion des délais moyens τ reste valable pour τ_{exp} .

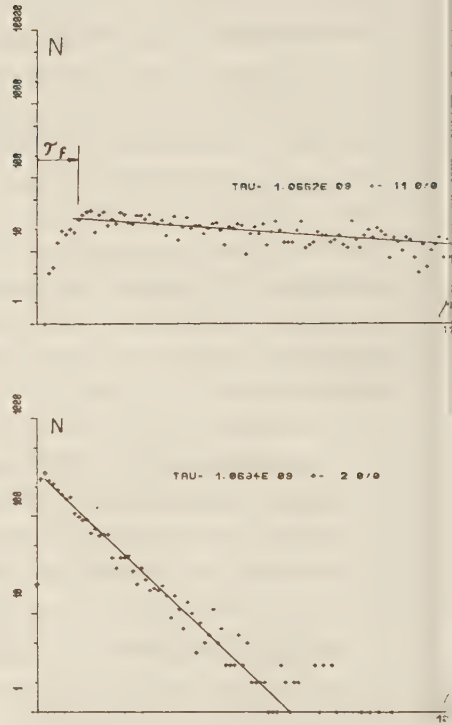


fig 4.6.1.2 Deux représentations avec différentes échelles du temps d'une même mesure. voit clairement apparaître un maximum dans distribution: τ_f est estimé à $100 \pm 30 \mu s$. TAU, calculé par l'ordinateur sera dorénavant appelé τ_{exp} . Mesuré avec l'électrode conique $\omega = 1,3$ tour/s ce qui donne une vitesse radiale moyenne v de 23 ± 2 cm/s. L'huile est contaminée par 2 gr/l de poudre de fer. $E = 31$ kV/cm.

4.6.2 TECHNIQUE DE MESURE

4.6.2.1 Montage expérimental. Les électrodes P-V cylindriques ou coniques sont montées sur une broche tournante qui elle-même est bridée sur la tête de la machine à électroérosion dont l'asservissement sera utilisé pour ajuster le gap pour l'électrode conique. La vitesse de rotation de la broche permettra de créer un mouvement relatif entre diélectrique et électrodes différent du mouvement provoqué par un gradient

de pression, mais indépendant de cette dernière. La pression sera modifiée en obstruant l'échappement du diélectrique. Un éventuel dégagement gazeux peut s'accumuler dans une poche prévue à cet effet dans le haut des électrodes, afin de ne pas diminuer leur surface en contact avec le liquide.

L'électrode conique 3.2.4.2 présente l'avantage d'un gap plus régulier sur toute la circonférence de l'électrode que son homologue cylindrique. 3.4.2.1 difficile à centrer avec une grande précision. Le mouvement relatif du diélectrique peut être obtenu soit par une rotation de l'électrode centrale ($0 \leq \omega \leq 1,5$ tour/s) avec $v = \omega r$, soit par injection sous pression du diélectrique $v = \text{Débit}/\text{section du gap}$, soit encore par la combinaison de ces deux moyens. Une forte injection sous pression (10 à 20 bars) n'est pas possible avec l'électrode conique, à cause de sa grande dimension qui mettrait en jeu des forces mécaniques de l'ordre de 5000 N sous 20 bars, ce qui serait 10 fois plus grand que les forces qui asservissent le gap !

Il découle des remarques de l'alinéa précédent que les résultats obtenus avec l'électrode cylindrique sont qualitativement très intéressants car ils sont relevés dans une plus grande plage de vitesse. Par contre, l'aspect quantitatif de ces mesures n'est pas précis: le champ électrique est inhomogène à cause des difficultés de centrage, la vitesse moyenne du diélectrique est pour les mêmes raisons fonction de la position angulaire d'observation. Lorsque l'électrode cylindrique est parfaitement centrée, le gap vaut 80μ .

4.6.2.2 Traitement des données. Il est fait avec les programmes utilisés pour l'électrode concentrique, dans lequel le nombre de rayons de mesure est ramené à 1. (un couple d'électrodes). Donc tous les 2900 délais mémorisés pour une mesure, servent à représenter une distribution de délais d'amorçage. La statistique du résultat s'en trouve améliorée, (comparaison entre la fig 4.6.1.1 et 4.6.1.2). Le traitement

des délais mesurés se réduit à tracer leur distribution semi-logarithmique puis à calculer τ_{exp} et son écart standard dans les limites estimées de la régression. τ_f est estimé par l'expérimentateur et non calculé par l'ordinateur. Cette appréciation est facile compte tenu de la possibilité de modifier l'échelle du temps.

4.6.3 DISTRIBUTIONS DES DELAIS D'AMORCAGE INDEPENDANTES DE LA PRESSION HYDROSTATIQUE DU MILIEU DE CLAQUAGE.

Dans une première série de mesures, nous avons voulu distinguer l'influence de la pression qui règne dans le milieu de mesure du mouvement d'ensemble de ce dernier par rapport aux électrodes.

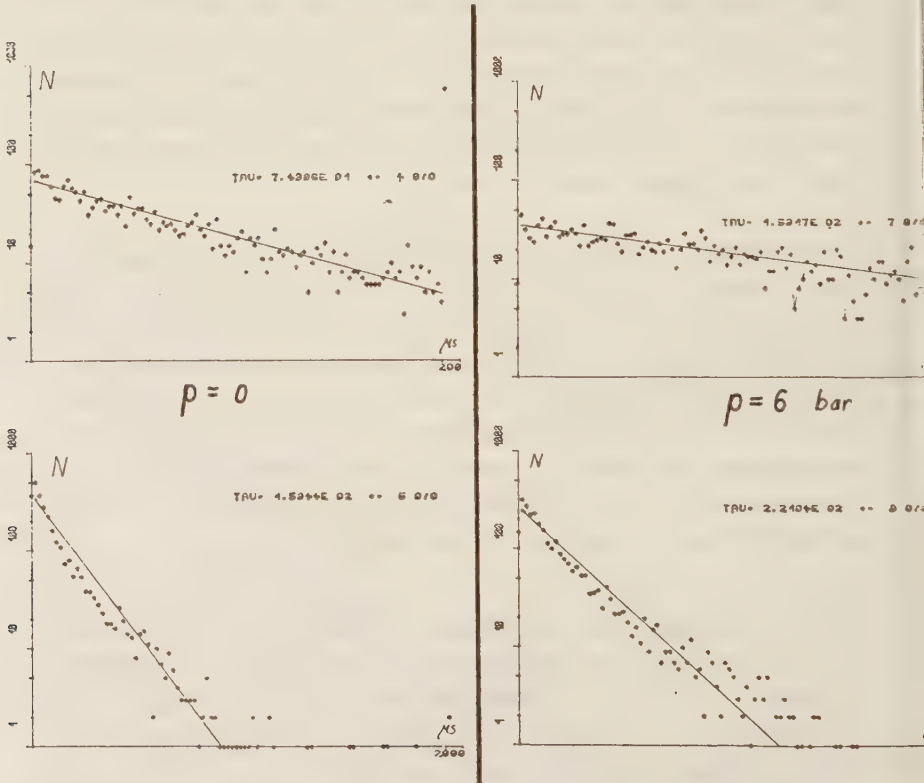


fig 4.6.3.1 Deux mesures avec agrandissement pour les délais courts, réalisées dans les mêmes conditions expérimentales excepté la surpression p : à gauche, elle est nulle, à droite 6 bar. Même avec ce fort agrandissement il n'apparaît pas de τ_f . Mesuré avec l'électrode conique, $U_B = 250 \text{ V}$, $E = 36,4 \text{ kV/cm}$, à vitesse de rotation $\omega = 0$. Diélectrique contaminé avec 2 gr/l de fer.

Sans mouvement, une pressurisation du diélectrique n'introduit pas de modification des histogrammes des délais, il n'apparaît pas de maximum dans ces distributions: la figure 4.6.3.1 nous montre 2 mesures relevées dans des conditions identiques et sans mouvement du diélectrique, excepté la surpression qui passe de 0 à 6 bars.

Cette propriété reste valable dans toute l'étendue des délais τ_{exp} mesurables: fig 4.6.3.2

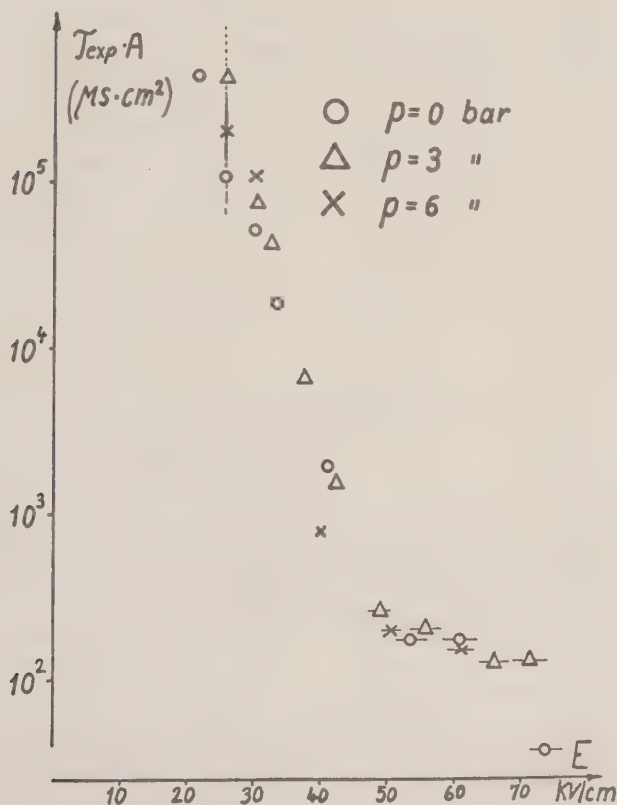


fig 4.6.3.2 Délais moyens en fonction du champ électrique pour différentes surpressions p du diélectrique qui est immobile. Mesuré avec l'électrode conique, sous 250 V, dans de l'huile contaminée par 0,2 gr/l de graphite de Madagascar ultra-fin.

De même, une pressurisation du milieu de claquage ne change pas les grandeurs τ_f et τ_{exp} qui caractérisent les distributions des délais mesurés avec un mouvement du diélectrique engendré par la rotation de l'électrode de mesure: fig 4.6.3.3

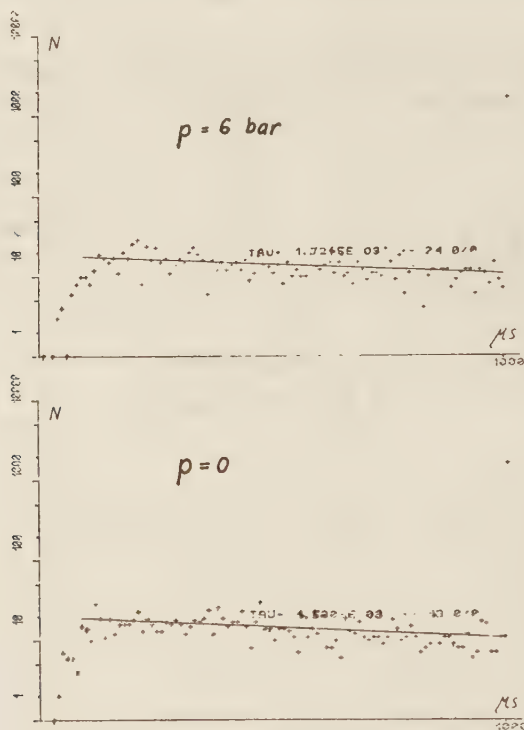


fig 4.6.3.3 Deux mesures de délais avec mouvement du diélectrique obtenu par rotation de l'électrode conique $\omega = 1,3$ tour/s. $U_B = 250$ V, $E = 40$ kV/cm, huile avec 0,08 gr/l de graphite de Madagascar ultra-fin. La surpression p ne modifie pas les τ_f .

Il nous reste à étudier les modifications des distributions des délais d'amorçage en fonction de la vitesse du diélectrique, nous le ferons séparément pour les deux paramètres qui les caractérisent: τ_{exp} et τ_f .

4.6.4 COMPOTEMENT DE τ_{exp} EN FONCTION DU MOUVEMENT DU DIELECTRIQUE

L'introduction d'un mouvement relatif entre les électrodes et le diélectrique n'introduit pas seulement un maximum $N(\tau_f)$ dans les histogrammes des délais mais modifie également la valeur du délai moyen d'amorçage τ_{exp} . Ce dernier devient donc une fonction de la vitesse moyenne relative v , en plus des paramètres étudiés précédemment. C'est cette fonction $\tau_{\text{exp}}(v)$ que nous allons étudier de plus près.

Son comportement général est complexe comme le montre par exemple la figure 4.6.4.1 relevée avec une concentration constante de graphite dans de l'huile, d'une part à vitesse de rotation nulle, d'autre part avec une vitesse de rotation de 1,35 tour/s, ce qui correspond à une vitesse tangentielle de 24 cm/s. On remarque qu'à champ électrique élevé la vitesse v augmente le délai moyen τ_{exp} alors qu'elle facilite l'amorçage à champ plus faible ! La variété de l'influence de la vitesse du diélectrique sur τ_{exp} se comprend par le croisement des deux courbes sur le graphique.

Un léger décalage d'une courbe par rapport à l'autre déplace beaucoup leur point d'intersection (puisque elles sont presque parallèles) et

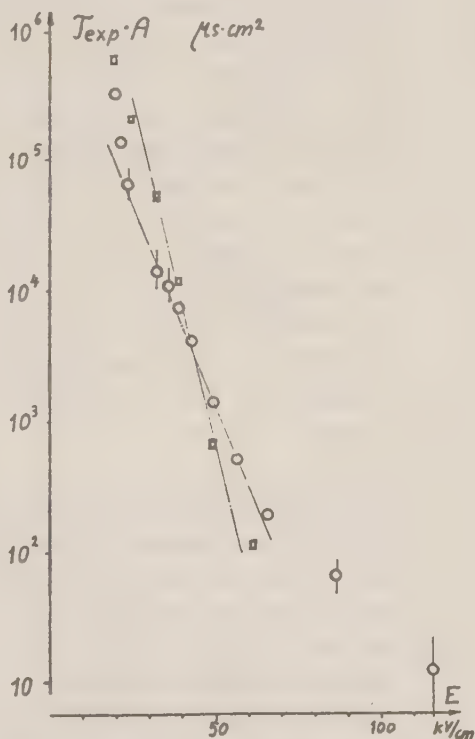


fig 4.6.4.1 Délais moyens τ_{exp} en fonction du champ électrique pour 2 vitesses différentes du diélectrique par rapport aux électrodes:

○ $v = 24 \text{ cm/s}$ ($\omega = 1,35 \text{ tour/s}$)

□ $v = 0$

huile contaminée avec 0,08 gr/l de graphite de Madagascar ultra-fin, $U_B = 250 \text{ V}$, mesuré avec l'électrode conique.

pourrait l'amener à une des extrémités de l'échelle du champ électrique. Pour l'extrémité à champ élevé, la courbe $\omega > 0$ serait entièrement au-dessous de celle à vitesse nulle. Ce serait le contraire si le croisement était reporté vers les faibles champs électriques. Cette "explication" se limite ici à des considérations géométriques, il faudrait connaître la raison physique du changement de pente entre les courbes et les causes d'un décalage de l'une par rapport à l'autre: nous voulons simplement montrer qu'une petite perturbation expérimentale, par exemple une concentration réelle du contaminant injecté non constante (décantation?, granulométrie?) serait suffisante pour modifier le sens de variation de τ_{exp} avec la vitesse. Lors d'une série de mesures avec l'électrode cylindrique, nous avons constaté que l'influence de la vitesse sur τ_{exp} est plus marquée pour de grandes concentrations de graphite dans l'huile. Les variables concentration C et vitesse v ne sont pas indépendantes dans ces conditions de mesure.

Les extraits des mesures présentées précédemment ont toutes été faites en contaminant l'huile avec du graphite. Des relevés analogues dans de l'huile fortement contaminée par une poudre de fer nous fournissent une série de résultats plus nets et parfaitement reproductibles: sur la fig 4.6.4.2, on remarque que la faible vitesse maximum de

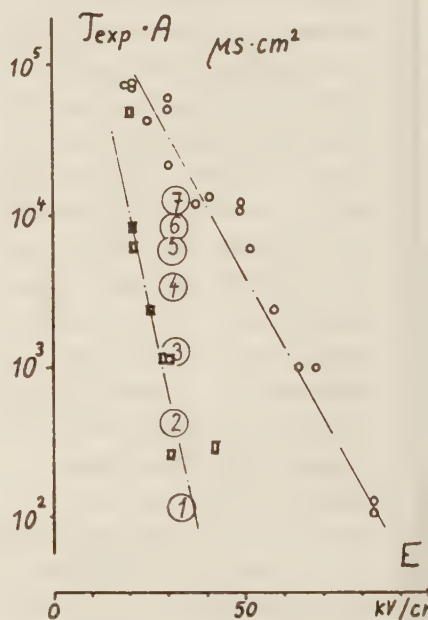


fig 4.6.4.2. Délais moyens en fonction du champ électrique.

□: sans mouvement de l'électrode

○: avec rotation maximum : $v = 24 \text{ cm/s}$

Les points numérotés de 1 à 7 sont des mesures à champ électrique $E = 33 \text{ kV/cm}$ constaté pour des vitesses de rotations intermédiaires:

1 : $v = 0 \text{ cm/s}$

2 : $v = 1,6 \text{ cm/s}$

3 : $v = 3 \text{ cm/s}$

4 : $v = 3,6 \text{ cm/s}$

5 : $v = 8,6 \text{ cm/s}$

6 : $v = 14,4 \text{ cm/s}$

7 : $v = 24 \text{ cm/s}$

Mesuré avec l'électrode conique, $U_B = 250$ dans de l'huile contaminée avec 2 gr/l de poudre de fer.

rotation de l'électrode conique augmente fortement les délais moyens τ_{exp} . D'autres mesures à champ électrique constant précisent la variation de τ_{exp} en fonction de la vitesse de rotation. Nous avons également injecté sous pression le diélectrique afin d'augmenter la plage de vitesse mesurable. Cette injection manuelle nous a d'autre part montré que l'effet d'une vitesse moyenne $v_D = D/\text{section d'écoulement}$ obtenue par injection sous pression est semblable quantitativement et qualitativement à celui obtenu par une vitesse de rotation $v_\omega = \omega \cdot r$ pour autant que $v_D = v_\omega$. La différence de distribution des vitesses dans le gap est donc sans influence sur τ_{exp} , la présence d'un gradient de vitesse dans le diélectrique suffit

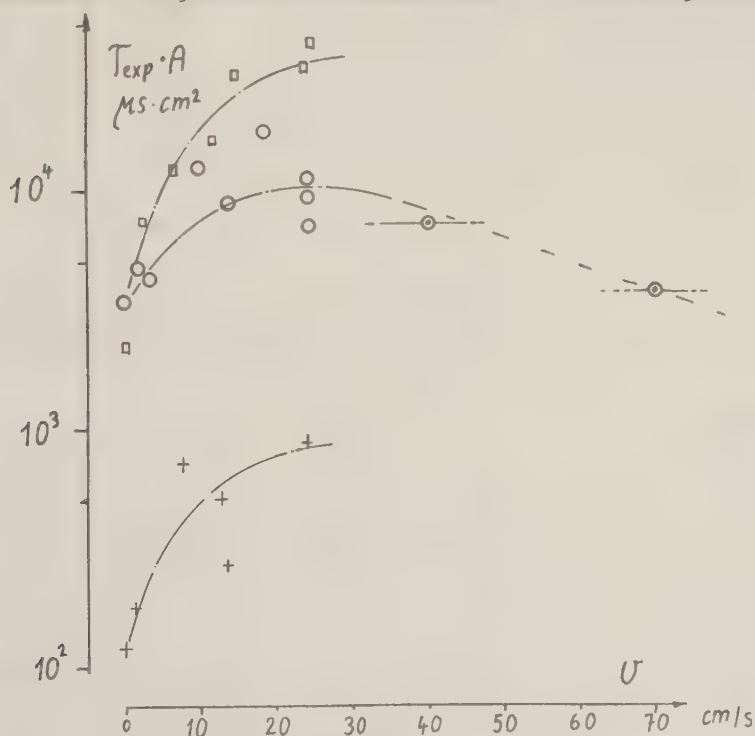
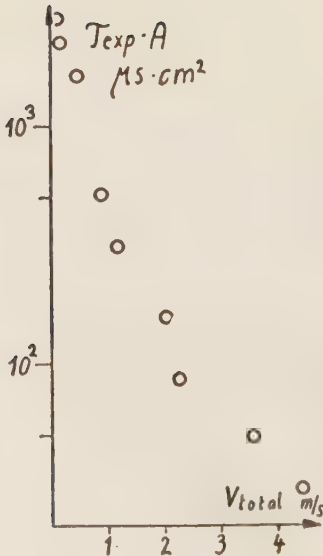
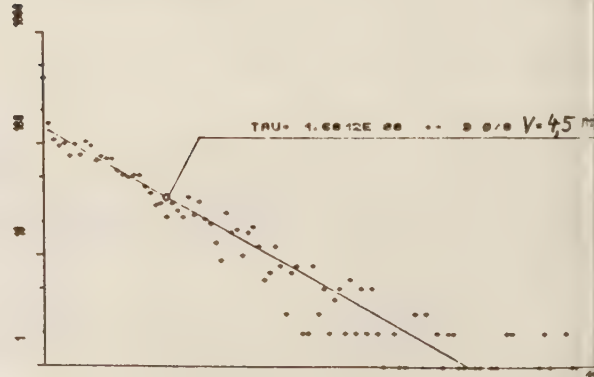
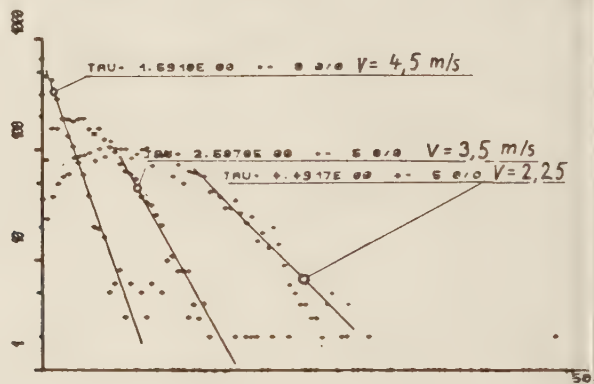
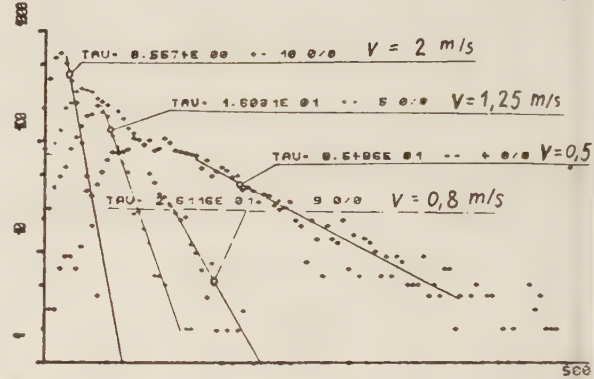
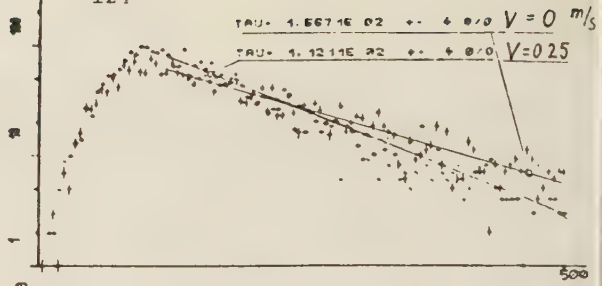


fig 4.6.4.9. Délais moyens τ_{exp} en fonction de la vitesse relative v du diélectrique. La concentration de fer est constante pour toutes les mesures (2 gr/l). Le champ électrique est constant pour chaque courbe:

- $E = 29 \text{ kV/cm}$
- $E = 35 \text{ kV/cm}$
- + $E = 71 \text{ kV/cm}$

Les vitesses entre 0 et 24 cm/s sont obtenues par rotation de l'électrode centrale, les vitesses supérieures ● sont obtenues par injection manuelle avec une seringue!

fig 4.6.4.4. A droite 9 distributions des délais d'amorçage mesurées avec l'électrode cylindrique en rotation: $\omega=1,32$ tour/s= $10,4$ cm/s. On superpose à la vitesse de rotation une vitesse d'écoulement v . Les pertes de charges dans le gap limitent v à $0,5$ m/s.bar. On constate qu'une augmentation de la vitesse diminue τ_{exp} . $U_p=250V$. Le champ électrique est au minimum de $31kV/cm$. Il devient plus grand et inhomogène si l'électrode est mal centrée ou déplacée par les grandes forces dues à la pression d'injection. Nous n'avons pas constaté de déplacements. (voir également $\tau_f(gap)$ au paragraphe suivant 4.6.5.2). L'huile est contaminée par $0,2$ gr/l de graphite de Madagascar ultrafin. Ci-dessous τ_{exp} en fonction de la vitesse totale du diélectrique $U_{total} = \omega v + \text{débit}/\text{section d'écoulement}$.



pour modifier τ exp. Les délais moyens mesurés à ces vitesses (40 et 70 cm/s) ont tendance à diminuer. Cette tendance serait confirmée par une ancienne série de mesures, faites avec une contamination de graphite dans l'huile, injectée dans l'électrode cylindrique: les vitesses obtenues s'étendaient jusqu'à 5 m/s avec une pression de l'ordre de 10 bars: fig 4.6.4.4

4.6.5 COMPOTEMENT DE τ_f EN FONCTION DU MOUVEMENT DU DIELECTRIQUE.

4.6.5.1 τ_f en fonction de la vitesse relative v du diélectrique. Nous venons d'examiner le comportement complexe des délais moyens τ exp lorsque le diélectrique est en mouvement. Il n'est pas de même du délai d'amorçage le plus fréquent τ_f . Nous savons qu'il n'existe pas dans un milieu immobile (on peut dire qu'il est nul). La figure 4.6.5.1 décrit son apparition avec l'augmentation de la vitesse de rotation, donc pour les très faibles vitesses tangentielles v . Pour un diélectrique contaminé avec du graphite, on constate que τ_f apparaît très brusquement, déjà pour $v = 1,2$ cm/s et que cette valeur initiale ne se modifie presque plus lorsque la vitesse passe de 1,2 à 10,3 cm/s. (apparition au sens biblique!) On parlerait presque en terme de "discontinuité".

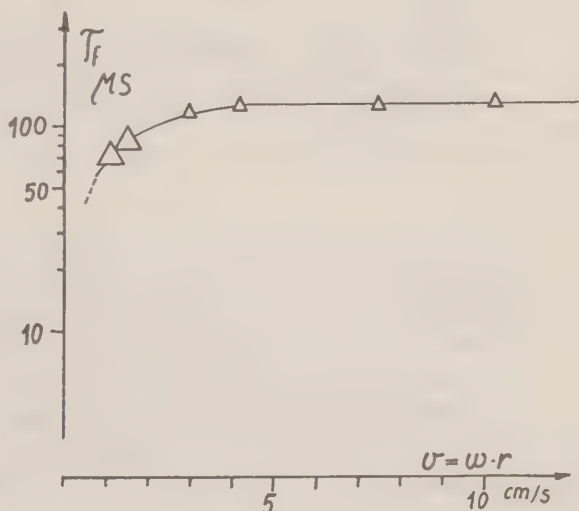


fig 4.6.5.1 Délai le plus probable τ_f en fonction de la vitesse relative du diélectrique obtenu par rotation de l'électrode cylindrique.
 $U_B = 250$ V, huile contaminée avec 0,2 gr/l de graphite de Madagascar ultra-fin.

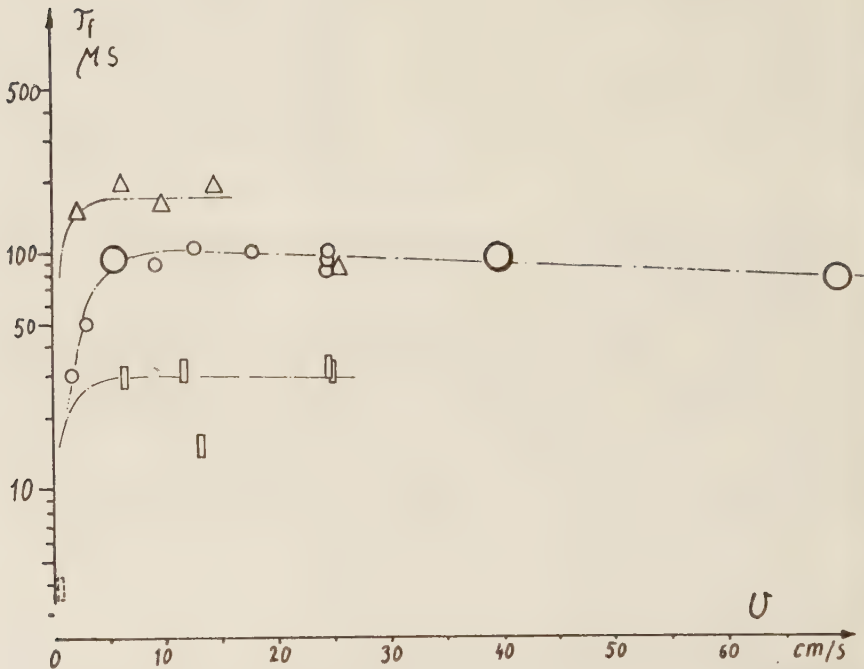


fig 4.6.5.2 Délai le plus probable τ_f en fonction de la vitesse relative du diélectrique contaminé par 2 gr/l de poudre de fer. $U_B = 230 \pm 10$ V

Δ E = 30 kV/cm, $v = \omega r$

$\bullet$ E = 36 kV/cm, $v = \omega r$

$\circ$ E = 36 kV/cm, $v = \text{débit}/\text{section de l'écoulement}$

$\square$ E = 70 kV/cm, $v = \omega r$

Une mesure similaire dans de l'huile contaminée par des poudres métalliques donne typiquement le même résultat, toutefois, l'apparition des τ_f est moins rapide, ces derniers augmentent légèrement pour des vitesses allant jusqu'à 4 cm/s. fig 4.6.5.2 On remarque sur cette même figure que τ_f ne dépend pas de la manière d'obtenir la vitesse moyenne relative v (injection ou rotation).

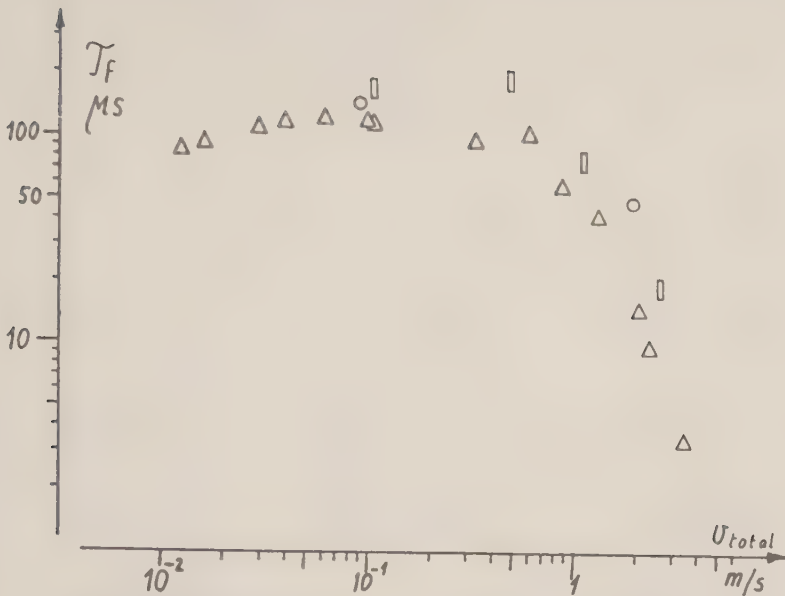


fig 4.6.5.3 Délai le plus fréquent τ_f en fonction de la vitesse totale du diélectrique: $v_{total} = \omega r + \text{débit/section d'écoulement}$. $U_B = 250$ V, électrode cylindrique (donc gap constant). L'huile est contaminée par:
 Δ : 0,2 gr/l de graphite: tiré des figures 4.6.5.1 et 4.6.4.5
 $\circ$: 0,01 gr/l de graphite
 $\square$: C6

Pour des vitesses plus grandes, nous avons donc, à nouveau injecté le diélectrique contaminé. fig 4.6.5.3. Nous l'avons fait pour diverses concentrations du contaminant. On constate que les délais les plus fréquents (τ_f) diminuent avec la vitesse relative du diélectrique lorsque cette dernière devient très grande. (de l'ordre des mètre/seconde).

4.6.5.2 τ_f en fonction du gap. Sur la figure 4.6.5.2, on remarque que les valeurs de τ_f dépendent du gap ou du champ électrique. Une série de mesures de τ_f faites pour différentes tensions U_B est reportée sur la fig 4.6.5.4.

Les délais d'amorçage les plus fréquents τ_f augmentent avec le gap à partir d'une dimension minimum. A gap constant, il semble que les τ_f augmentent avec la tension de claquage, une représentation en fonction du champ n'est ni plus simple, ni plus claire.

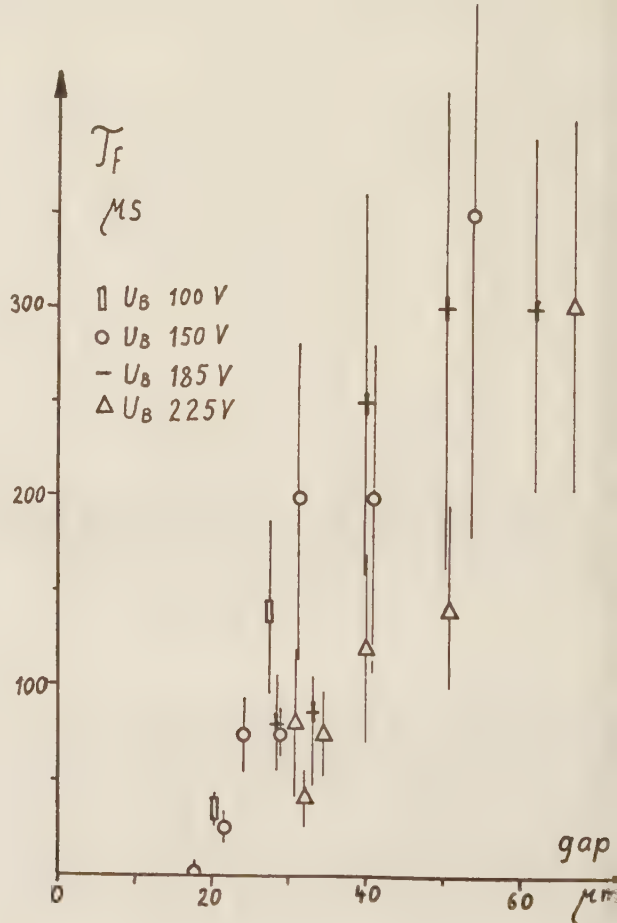


fig 4.6.5.4 Délai d'amorçage le plus fréquent τ_f en fonction du gap, pour différentes tensions de claquage U_B . Mesuré avec l'électrode conique dans de l'huile contaminée par 2 gr de poudre de fer.

4.6.5.3. Indépendance de τ_f par rapport à la contamination. Les mesures présentées à la figure 4.6.5.3 montrent que le délai le plus fréquent n'est pas fonction de la concentration du contaminant. Même des mesures faites dans de l'huile décantée (non contaminée) correspondent à celles relevées avec 2 gr/l de poudre de fer: voir fig 4.6.5.5.

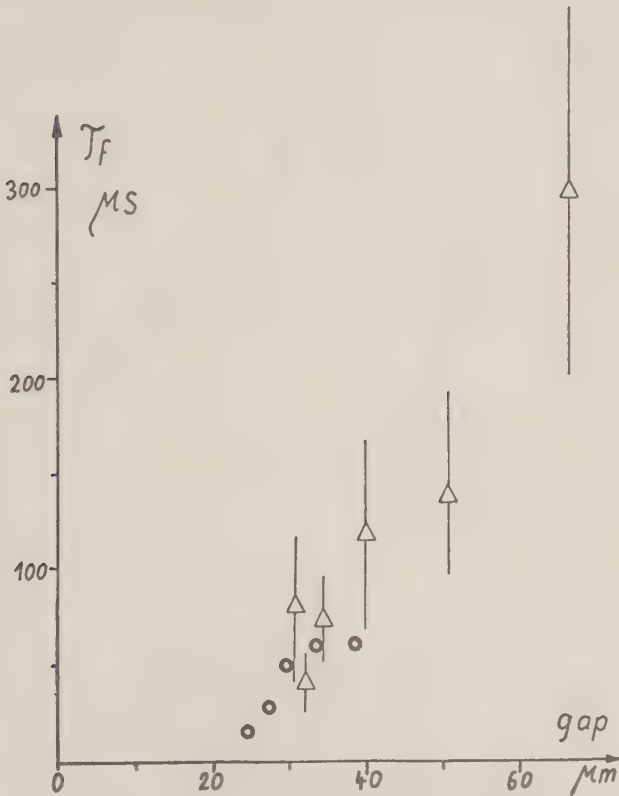


fig 4.6.5.5 ○:Délai le plus fréquent en fonction du gap, mesuré avec une tension de claquage $U_B = 250$ V, dans une huile décantée. A comparer avec les résultats obtenus avec une forte contamination de poudre de fer (Δ) tiré de la figure 4.6.5.4 pour $U_B = 225$ V.

4.7 INFLUENCE DE LA TENSION D'AMORCAGE U_B SUR LES DELAIS MOYENS τ_{exp} .

Un peu artificiellement, nous n'avons précédemment pas parlé de l'influence de la tension de claquage U_B . Les résultats présentés jusqu'ici ont simplement été reportés en fonction du champ électrique. En utilisant les mêmes moyens de mesure (hardware et software) nous allons maintenant reporter en fonction du

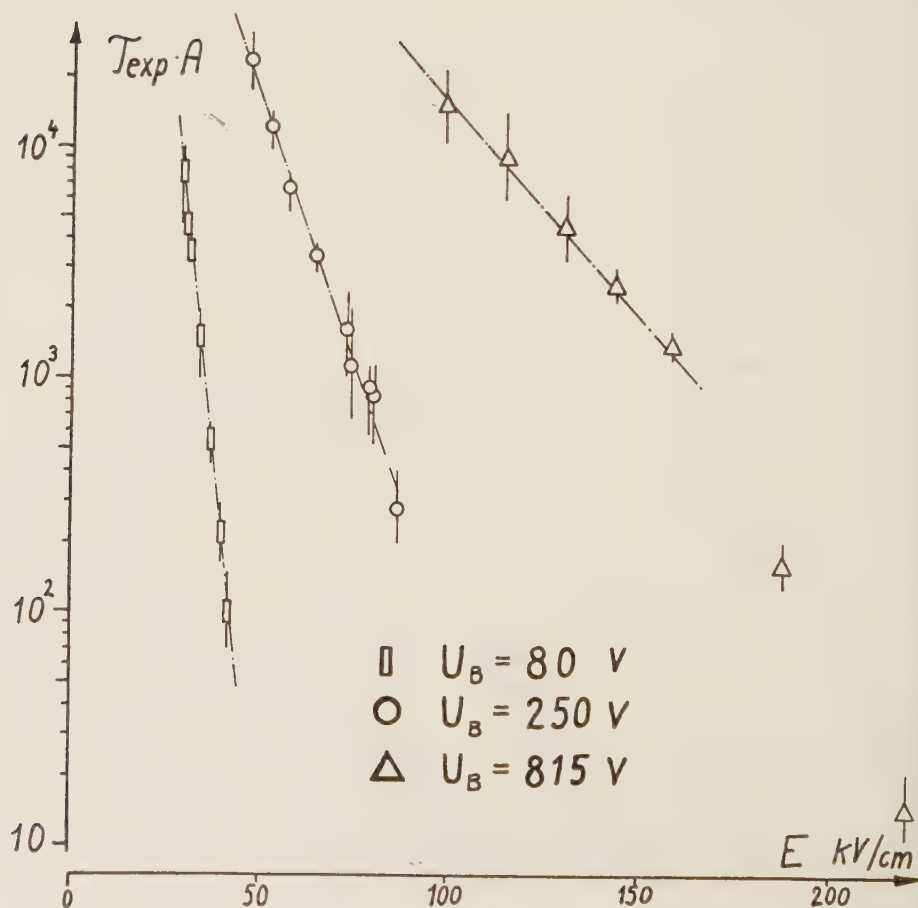


fig 4.7.1.1 Délai moyen d'amorçage τ_{exp} en fonction du champ électrique, pour différentes tensions d'amorçage U_B . Mesuré avec l'électrode cylindrique, dans de l'huile contaminée naturellement: C1 (Une droite relevée pour $U_B = 610 \text{ V}$ n'a pas été reportée sur ce graphique car sa position dans la figure ci-dessus est apparemment incohérente !).

champ électrique, des mesures de τ_{exp} pour diverses tensions d'amorçage U_B : fig 4.7.1.1.

On remarque que les délais d'amorçage ne sont pas seulement dépendants du champ électrique E (du rapport U_B/g) mais sont fonction séparément des deux variables U_B et g . Cet effet a également été observé par U. Rudolf { 1 } . Nous avons constaté qu'il est très général, indépendant de problèmes géométriques ou de contaminant.

CHAPITRE 5

DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

MESURES COMPLEMENTAIRES

La discussion de nos résultats se subdivisera pour plus de clarté en trois parties principales: nous introduirons ce chapitre en parlant des mesures en fonction de la tension de claquages (4.7), puis nous aborderons l'interprétation des mesures avec diélectrique en mouvement (4.6), finalement la discussion se portera sur les résultats en fonction de la surface des électrodes. Au travers de cette subdivision artificielle, il devrait se dessiner une synthèse plus générale qui marque le changement d'orientation de l'interprétation des mesures faites dans notre laboratoire. Au fil de la discussion, nous suggérerons, dans la mesure du possible, des expériences permettant de tester les interprétations de nos résultats.

5.1 DISCUSSION DES MESURES EN FONCTION DES TENSIONS DE CLAQUAGE.

5.1.1 COMPARAISON DE NOS RESULTATS AVEC LES MESURES DANS DES DIELECTRIQUES PURIFIES.

Pour une valeur de U_B fixée, et une concentration d'un contaminant donné, constante, les délais moyens τ_{exp} mesurés en fonction du champ électrique $E = U_B/g$ avec une électrode de surface A sont de la forme:

$$\log (\tau_{exp} \cdot A) = \log (\tau_{exp} \cdot A)_{E=0} - \frac{E}{E_0} \quad 5.1.1.1$$

Ce résultat est qualitativement identique à ceux mesurés par d'autres chercheurs, (par exemple Brignell et Metzmacher {17}) qui travaillent dans les hydrocarbures hautement purifiés. Pour des champs très élevés, ($> MV/cm$) leur droite s'incurve, (E_0 augmente) on entre dans la zone des temps formatifs ($\sim ns$) comportement que notre appareillage ne nous permet pas de mettre en évidence, notre unité de temps est au minimum de 25 ns.

Quantitativement, nous détectons des claquages d'un délai τ_{exp} donné avec des champs électriques apparemment beaucoup plus faibles, dans de l'huile contaminée. Nos champs électriques sont de l'ordre de ceux utilisés dans les transformateurs avec refroidissement à huile.

La concordance entre les travaux cités précédemment et nos mesures cesse dès que l'on modifie la tension de claquage U_B : en effet nos délais moyens τ_{exp} sont dépendants de deux variables par exemple $\tau_{exp} = f(E, U_B)$ alors que dans les diélectriques purifiés on a $\tau_{exp} = f(E)$. Ce qui revient à dire que E_0 dans l'équation 5.1.1.1 est fonction de U_B dans les diélectriques contaminés, de même que l'ordonnée à l'origine: $(\tau_{exp} A)_{E=0}$. E_0 augmente avec U_B alors que $(\tau_{exp} \cdot A)_{E=0}$ diminue. (fig 4.7.1.1). Pour des diélectriques contaminés nous devons écrire:

$$\log (\tau_{exp} \cdot A) = \log (\tau_{exp} \cdot A)_{E=0} (U_B) - \frac{E}{E_0 (U_B)} \quad 5.1.1.2$$

Relevons que le sens de l'influence de U_B est surprenant puisqu'à champ électrique constant le délai moyen d'amorçage τ_{exp} augmente si la tension de claquage augmente. Cette dernière remarque met en valeur l'importance prédominante du gap par rapport à la tension de claquage U_B , sur les délais moyens τ_{exp} .

5.1.2 REPRESENTATION DES RESULTATS

Les droites dans les graphes $\log(\tau_{exp} \cdot A) = f(E)$ sont peu suggestives lorsqu'elles sont reportées pour des diélectriques contaminés, puisque l'équation 5.1.1.1 prend la forme 5.1.1.2 difficilement interprétable (fig 4.7.1.1). Si l'on reporte les délais moyens τ_{exp} en fonction de g^{-1} , (fig 5.1.2.2) le résultat se présente sous une forme un peu plus simple dans la mesure où les droites sont parallèles c'est-à-dire que g_0 est constant dans l'équation ci-dessous:

$$\log(\tau_{exp} \cdot A) = \log(\tau_{exp} \cdot A)_{g^{-1}=0}(U_B) - \frac{g_0}{g} \quad 5.1.2.1$$

Notons qu'elles ne le sont que pour une contamination identique car une droite tracée au travers de la zone des $\tau_{exp} \cdot A$ que nous avons mesurés dans de l'huile propre avec $U_B = 250$ V (équation 5.1.3.1) serait beaucoup plus plate (fig 5.1.2.2).

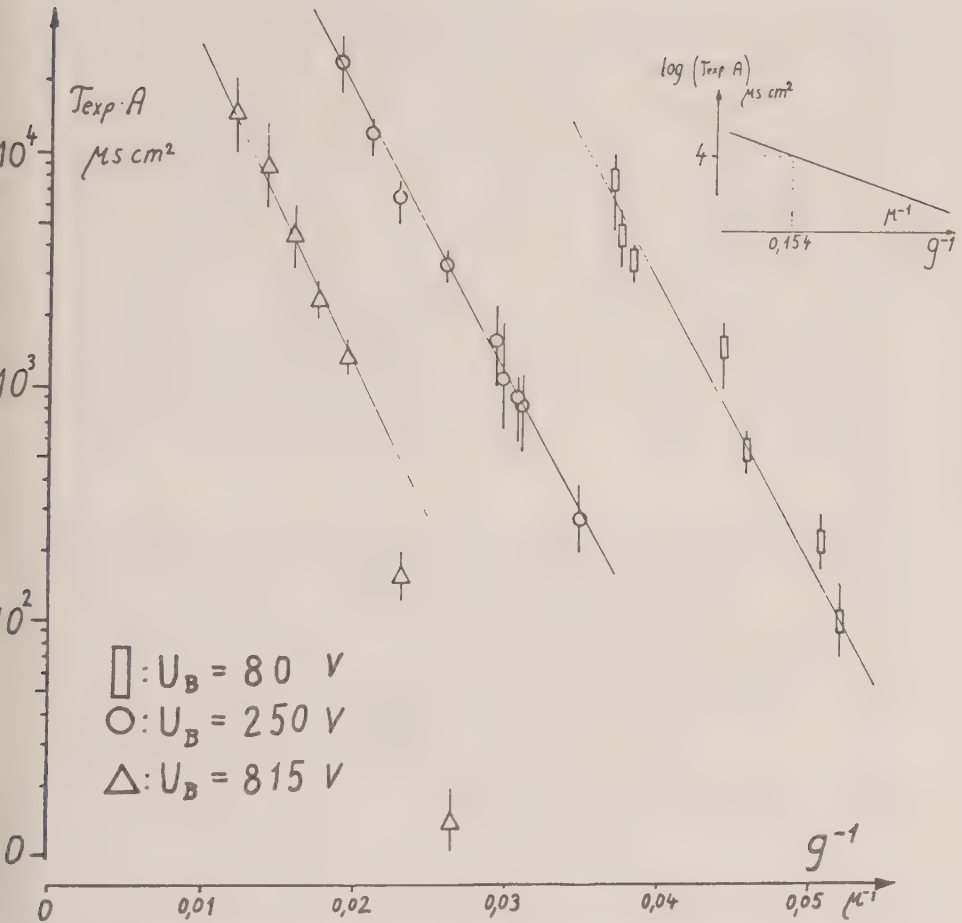


fig 5.1.2.2 Représentation des délais moyens $\tau \exp A$ en fonction de l'inverse du gap: $g^{-1} (\mu^{-1})$. Dans le coin supérieur droit de la figure, nous avons reporté (translaté) une portion de la droite mesurée dans de l'huile propre sous 250 V, à la même échelle afin de pouvoir comparer les pentes. Les 3 autres droites sont relevées dans de l'huile contaminée Cl.

La représentation en fonction du gap n'est finalement guère meilleure que celle en fonction du champ électrique, il est toutefois moins surprenant de constater que pour un gap donné, les délais d'amorçage diminuent lorsque la tension de claquage augmente. Que E , respectivement g , ne soient pas de "bonnes" variables pour une représentation graphique n'est guère étonnant:

les grandeurs attribuées à ces deux variables sont des valeurs apparentes: nous prenons pour le gap l'écartement entre les deux électrodes, sans tenir compte de la contamination qui occupe une fraction du gap, égale en moyenne à la concentration volumique de contaminant, si ce dernier est très fin et parfaitement mélangé au diélectrique. Si ces conditions sont remplies, le gap ne serait pas trop modifié par la contamination puisque sa concentration est de l'ordre de 10^{-3} . En conséquence, le champ électrique apparent $E = U_B/g$ correspondrait à une assez bonne approximation si l'on pouvait négliger son renforcement au voisinage des particules métalliques dans le diélectrique. Pratiquement, il est certainement loin d'être homogène dans le volume $A \cdot g$; la valeur $E = U_B/g$ est un minimum probablement nulle part atteint.

5.1.3 GAP VIRTUEL Oublions un instant les inhomogénéités du champ électrique et faisons l'hypothèse que les délais τ_{exp} que nous avons mesurés sous $U_B = 250$ V dans de l'huile propre, filtrée, ne sont que fonction du champ électrique $E = U_B/g$, ce qui reste à montrer expérimentalement. Choisissons une droite dans le nuage de points relevés pour de l'huile propre (fig 4.4.1.2). Traçons-la de même pente que la prolongation des mesures de Brignell et Metzmacher {17} ce qui est possible (elle serait éventuellement un peu plus raide); on obtient:

$$\log_{10} (\tau_{\text{exp}} \cdot A) = 7,5 - 9,1 \cdot 10^{-3} E \quad 5.1.3.1$$

où $E = U_B/g$ est en kV/cm
et $\tau_{\text{exp}} \cdot A$ en $\mu\text{s cm}^2$

Cette droite est reportée sur le graphique 5.1.3.2 en fonction du gap de même que les mesures dans de l'huile contaminée Cl, relevée pour diverses tensions de claquage.

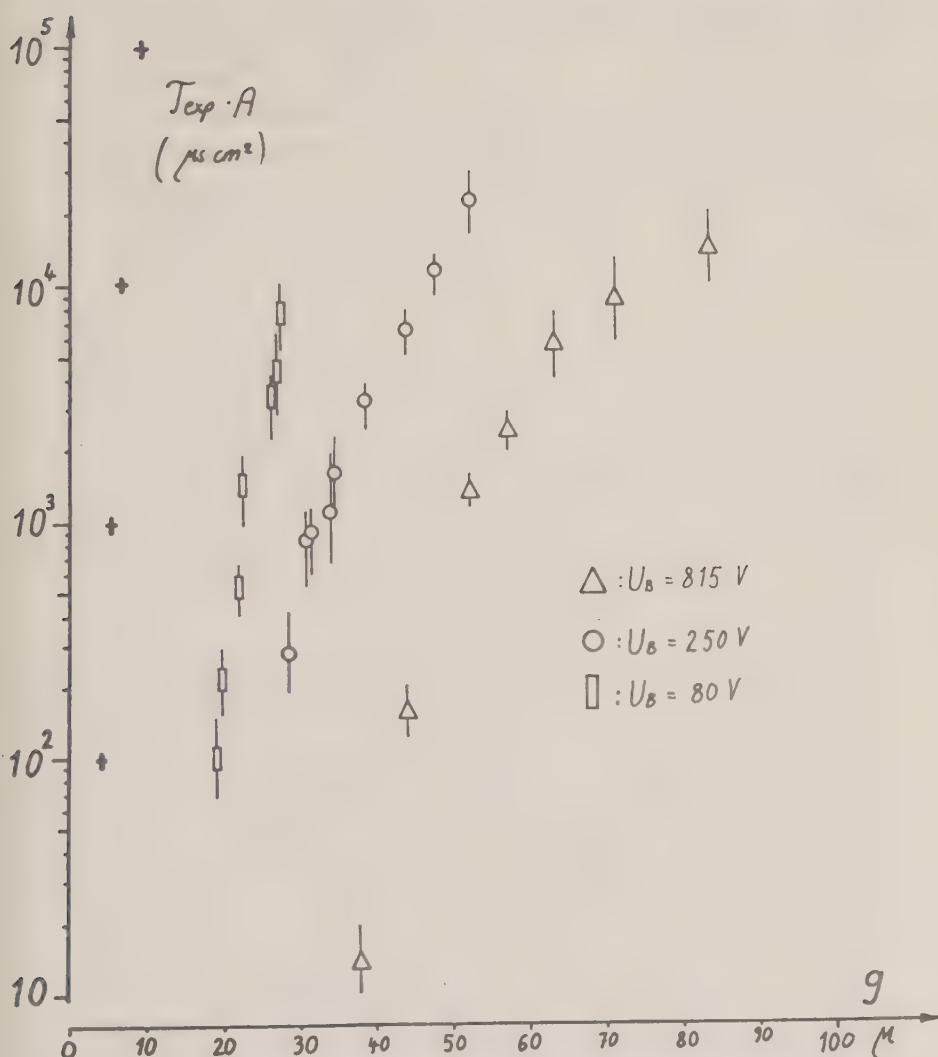


fig 5.1.3.2. Délais moyens τ exp en fonction du gap pour différentes tensions d'amorçage U_B , et différentes contaminations.

- $\square$ $U_B = 80 V$ contamination = Cl
- $\circ$ $U_B = 250 V$ contamination = Cl
- Δ $U_B = 815 V$ contamination = Cl
- $+$ $U_B = 250 V$ pas de contamination, huile propre, filtrée

On voit bien dans cette figure l'accroissement du gap provoqué par la contamination. Dans toute la plage des délais mesurés le gap est $6,7 \pm 0,5$ fois plus grand que dans l'huile propre à 250 volts. Pour $U_B = 80$ volts et 815 volts, le gap serait respectivement $14 \pm 0,6$ et $3,3 \pm 0,2$ fois supérieur à celui de l'huile propre, si, comme nous en faisons l'hypothèse, le délai moyen était indépendant de la tension de mesure dans l'huile propre. Le fait que les facteurs ci-dessus soient remarquablement constants dans toute l'étendue de nos mesures peut s'expliquer par le fait que la concentration de contamination est constante pour tous les gaps de mesure. Pour que les délais moyens τ_{exp} de l'huile contaminée soient indépendants de la tension de mesure, il faudrait donc remplacer le gap mesuré par un gap virtuel respectivement 6,7, 14, et 3,3 fois plus petit. Une très grande fraction du gap serait court-circuitée par la contamination si l'on désirait expliquer l'abaissement apparent du champ de claquage par la seule présence de cette dernière: sa concentration volumique devrait tendre vers 1 pour que cette condition soit réalisée, alors qu'elle n'est que de l'ordre de 10^{-3} ! Si l'on désire malgré tout poursuivre cette tentative d'explication, il faut admettre qu'il se crée dans le gap un certain ordre, par exemple une juxtaposition d'alignement de particules métalliques dans le diélectrique qui neutraliserait la plus grande partie du gap. Dans ces conditions, nos mesures seraient qualitativement et quantitativement comparables à celles des chercheurs travaillant dans des diélectriques purifiés. Poursuivons cette description et examinons les diverses longueurs d'alignements des particules nécessaires à rendre les délais indépendants de la tension de claquage: la longueur l de ces chaînes est fonction du délai moyen (c'est-à-dire du gap de mesure). Pour $U_B = 250$ V on lit directement l sur la figure 5.1.3.2, par exemple avec $\tau_{\text{exp}} \cdot A = 10^3$, $l \approx 32,5 - 5,05 \approx 27,5 \mu$. Pour le même délai moyen, on trouve $l \approx 21 \mu$ pour 80 V et $l \approx 35 \mu$ pour 815 V. On voit que l doit augmenter si U_B augmente, et ce d'autant plus pour des délais moyens plus grands. Il ne serait pas étonnant que les longs alignements de particules soient plus

rares, (un ordre plus élevé serait plus difficile à obtenir), ce qui expliquerait la dépendance des délais moyens en fonction de la tension de claquage.

Quantitativement, une huile contaminée par des particules sphériques de rayon r , de concentration volumique C , peut court-circuiter une fraction γ du gap par un alignement de particules sur une surface dA donnée par:

$$dA = \frac{3 \pi \gamma r^2}{2 C}$$

$dA \approx 7500 \mu^2$ pour une contamination $C1$, avec $\gamma = 1$, donc la distance séparant les ponts est de l'ordre de $\sqrt{dA} = 90\mu$ ce qui est relativement grand, typiquement de la dimension du gap, pour approcher un "gap virtuel", il faudrait une densité de ponts beaucoup plus grande, c'est-à-dire une poudre très fine. (voir photographies du paragraphe 4.3).

5.2 DISCUSSION DES MESURES EN FONCTION DU MOUVEMENT DU DIELECTRIQUE.

5.2.1 INTERPRETATION DES RESULTATS L'apparition d'un "délai le plus fréquent" τ_f précédé d'une faible probabilité d'amorçage s'interprète naturellement de la manière suivante: τ_f est le temps moyen minimum qu'il faut pour qu'une décharge puisse éclater, le temps le plus fréquent τ_f serait donc un temps formatif τ_f . La distribution des temps formatifs autour de la valeur moyenne τ_f serait alors une gaussienne, et le délai d'amorçage résulterait de la convolution de cette gaussienne avec une distribution exponentielle représentant la densité temporelle de probabilité d'avoir un claquage (qui est une constante). Monsieur Ratajski a fait des calculs numériques de convolutions qui permettent de retrouver de cette manière les distributions mesurées. La décomposition de nos mesures en une partie gaussienne et une partie exponentielle est possible en jouant sur l'écart standard

de la gaussienne et en partant de délais moyens τ_{exp} mesurés. Notons que les temps formatifs retrouvés par le calcul, τ_f gauss, ne sont identiques aux délais les plus fréquents τ_f que pour de très petites dispersions de la gaussienne. Dans les autres cas, les τ_f sont un peu trop grands. Nous ne tiendrons pas compte par la suite de cette différence, car elle n'améliore pas, d'une manière générale, ni ne modifie les résultats et leur interprétation.

Nous attribuons à des phénomènes de collage et d'adhérence à la cathode les difficultés rencontrées lors de mesures de délais moyens, avec les électrodes tournantes, dans de l'huile contaminée uniquement par du graphite.

5.2.2 NATURE DES TEMPS FORMATIFS Quantitativement, les τ_f mesurés s'étendent jusqu'à des durées de 400 μs pour des grands gaps. Sans mouvement des électrodes, les délais moyens τ_{exp} relevés peuvent atteindre la durée minimum mesurable ($< 1 \mu\text{s}$) en restant distribués purement exponentiellement. Le temps formatif intrinsèque de la décharge semble donc, dans les mesures immobiles, être plus petit que, ou au maximum de l'ordre de la microseconde, ce qui est incomparable avec les τ_f provoqués par un mouvement relatif des électrodes. Nous ne nous expliquons pas par quel mécanisme le temps formatif intrinsèque de la décharge devrait passer d'une fraction de microseconde au repos, à plusieurs centaines de microsecondes, en déplaçant les électrodes à des vitesses relatives faibles, de l'ordre du cm/s ; en d'autres termes, un déplacement d'un centième de micron durant le temps formatif intrinsèque de la décharge devrait augmenter ce dernier d'un facteur plus grand que 1000 ! Il est donc difficile de lier les temps formatifs τ_f mis en évidence par un mouvement mécanique des électrodes au processus physique, et à la nature même du claquage.

Le fait que les τ_f soient provoqués par un mouvement mécanique laisse penser qu'ils sont peut-être de nature mécanique, durant

τ_f le diélectrique contaminé se conditionne, se prépare, se "met en forme", s'ordonne pour permettre un claquage qui suivra, avec une fréquence moyenne donnée par τ_{exp}^{-1} . La mise en mouvement du diélectrique ou des électrodes perturberait ou neutraliserait cette préparation du milieu de claquage. On pourrait reprendre l'idée simple de l'alignement des particules décrit au paragraphe précédent: ces chaînes seraient certainement perturbées par un gradient de vitesse dans le diélectrique que ce dernier soit provoqué par un mouvement des électrodes ou par une injection du liquide.

Evaluons le temps nécessaire pour établir un alignement de particules dans le champ électrique; admettons(!) qu'il est de même ordre que le temps de parcours d'une petite sphère métallique de rayon r et de masse spécifique ρ , chargée qui traverse complètement le gap, à la vitesse v . La charge q qu'acquiert une particule au contact d'une électrode dans le champ E supposé homogène est donnée par Maxwell : $q = \frac{2}{3} \pi^3 \epsilon \epsilon_0 r^2 E$. Elle subit principalement 2 forces antagonistes:

Force motrice = qE

Force de frottement dans le diélectrique de viscosité η : $F_\eta = 6\pi\eta rv$

L'équation du mouvement s'écrit:

$$m \frac{dv}{dt} = qE - 6\pi\eta rv$$

d'où l'on tire la vitesse de la particule en fonction du temps:

$$v(t) = (v_0 - v_\infty) e^{-t/\tau_\eta} + v_\infty \quad 5.2.2.1$$

où

$$v_\infty = \text{vitesse d'équilibre} = \frac{\pi^2 \epsilon \epsilon_0 r E^2}{9\eta}$$

$$\tau_\eta = \text{constante de temps d'établissement de } v_\infty; \tau_\eta = \frac{2\rho r^2}{9\eta}$$

v_0 est la vitesse initiale comprise entre 0 (dwell time) et v_∞ pour un choc parfaitement élastique.

(Dans le cas d'un alignement de particules, le champ E ne serait évidemment pas constant).

Discutons les ordres de grandeur pour un exemple typique:

$$U_B = 250V \quad , \quad \rho = 8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 \quad , \quad \eta = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Ns/m}^2 \quad , \quad r = 3\mu$$

$$g = 60 \mu \quad , \quad \varepsilon = 2$$

$$\tau_\eta \approx 3,5 \cdot 10^5 r^2 = 3,2 \mu s$$

$$v_\infty \approx 3,9 \cdot 10^{-9} U_B^2 r / g^2 = 0,2 \text{ m/s}$$

τ_η est négligeable devant $t(g) = g/v_\infty \approx 300 \mu s$, le temps de transfert $t(g)$ peut donc s'évaluer en admettant que la vitesse est constante, d'autant plus que v_0 n'est pas forcément nulle. Les temps formatifs τ_f mesurés sont tout à fait comparables au temps de transfert calculé ci-dessus (n'oublions pas les nombreuses hypothèses faites pour arriver à ce résultat). De plus, qualitativement, la dépendance du temps de transfert en fonction du gap est compatible avec nos mesures. Par contre, nous ne retrouvons pas le facteur E^{-2} dans les données expérimentales de la figure 4.6.5.4., l'influence du champ semble moins marquée. Enfonçons-nous tout de même un peu plus dans la "jungle" des hypothèses et attribuons à chaque alignement de particules une probabilité, petite mais constante, d'induire un amorçage par un mécanisme quelconque (par exemple, un mouvement de va-et-vient des chaînes de particules qui produisent des microdécharges à l'approche d'une électrode ? ou une fluctuation de la longueur des chaînes autour d'une valeur d'équilibre ? ou ??...). L'attribution de cette faible probabilité constante contient en elle le germe de la distribution exponentielle des délais d'amorçage τ_{exp} . La dépendance en fonction de la surface est également vérifiée, de même le comportement en fonction de la concentration du contaminant dont dépend la densité superficielle des chaînes d'une longueur donnée. Nous pouvons trouver d'autres analogies entre cet embryon de modèle et le comportement expérimental observé. (L'embryon grossit, les fauves du paragraphe suivant adorent les bons gros embryons !). Reprenons l'expression du temps de transfert $t(g)$ des particules (ou des groupements de particules) que nous avons liée à τ_{exp}

$$t(g) \approx \frac{g}{v_{\infty}} \approx \frac{\eta}{\epsilon r} \frac{g}{E^2} \approx \frac{\eta}{\epsilon r} \frac{g^3}{U_B^2}$$

Sous cette forme, on voit apparaître ce que nous aurions à tort appelé la dépendance en fonction de la tension de claquage qui serait en réalité une dépendance du gap. (voir paragraphe précédent: influence du gap > influence de U_B).

Le parallélisme de comportement, entre τ_f et τ_{exp} , souvent observé, serait dû à v_{∞} qui interviendrait tant pour τ_f que pour τ_{exp} .

Il est possible d'imaginer une toute autre explication basée sur les tourbillons électrohydrodynamique: le temps formatif correspondrait au temps τ_{EHD} de mise en mouvement d'un liquide de viscosité η et de constante diélectrique ϵ qui est donné par la formule:

$$\tau_{EHD} = \frac{N \eta}{\epsilon \epsilon_0 E^2} \quad 5.2.2.2$$

L'auteur de cette formule {13}{14} situe N entre environ 1 et 100 ce qui, quantitativement, donne pour τ des valeurs situées dans la plage mesurée (comparaison avec la fig. 4.6.5.4), en prenant pour E le champ apparent. Si l'on prend le champ défini par le gap virtuel, les τ_{EHD} ont tendance à être un peu petits. Compte tenu de l'incertitude de N , il y a une bonne concordance quantitative, malgré le fait que l'on ne retrouve pas la dépendance en E^{-2} . (Une diminution des τ_f quand E augmente est visible sur la fig 4.6.5.4). Pour que cette explication soit crédible, il faudrait admettre que l'inertie des tourbillons de liquide est telle qu'ils ne ralentissent pratiquement pas durant les T_I , raison pour laquelle on ne détecte pas les τ_f sans mouvement relatif du diélectrique. De plus, il faut supposer que les mouvements électrohydrodynamiques sont rapidement détruits par un gradient de vitesse transversal dans le diélectrique.

5.2.3 MESURES COMPLEMENTAIRES

5.2.3.1 Inertie EHD Si ce sont les phénomènes électrohydrodynamiques qui sont responsables des délais moyens, alors, dans un diélectrique immobile, nous devrions mettre en évidence des temps formatifs lorsque T_I est très grand, c'est-à-dire que le mouvement tourbillonnaire créé par une décharge se serait complètement immobilisé durant T_I , et qu'il faudrait donc le relancer à chaque amorçage, ce qui donnerait un temps formatif. Des mesures de τ_f en fonction de T_I pour des électrodes en mouvement et au repos, à champ constant, ont été faites précédemment dans un autre but. Leur examen pour tester l'inertie des phénomènes EHD ne donne pas d'information suffisante tant pour un rejet de cette hypothèse que pour sa confirmation: notons que quelques mesures faites avec T_I court, marquent une diminution voir une disparition des τ_f , et que pour des T_I passant de 500 μs à 200 ms, τ_f augmente de 20 %, ce qui est à la limite d'un changement significatif. Pour T_I de l'ordre de 10 ms, on remarque également une légère augmentation des délais moyens lorsque l'électrode est en mouvement. Pour les mêmes T_I , les mesures de délais moyens n'étaient plus possibles avec l'électrode immobile, à cause de la grande proportion de courts-circuits. Par ailleurs, nous avons généralement constaté un parallélisme de la variation de τ_{exp} et de τ_f , ce qui justifierait une poursuite de ces mesures en fonction de T_I mais cette fois dans le but spécifique de mettre en évidence une éventuelle inertie des phénomènes EHD.

5.2.3.2 Temps formatifs dans de l'huile immobile. Si les temps formatifs sont causés par la création d'un "ordre" dans le diélectrique, nous devrions pouvoir les mettre en évidence sans mouvement permanent du diélectrique, ce dernier n'étant que responsable de l'annihilation de l'"ordre". Nous avons donc réalisé l'expérience suivante, en alternant des périodes de mesures pour un diélectrique immobile avec des périodes de rotation des électrodes durant lesquelles on détruit l'"ordre" créé par les mesures.

Un exemple des distributions mesurées est reporté sur la figure 5.2.3.1. Nous avons accumulé une succession de 580 périodes de mesures, chacune étant composée de 5 claquages. Nous avons regroupé ensuite les délais mesurés en 5 distributions: la distribution A recense les 580 premières décharges de chaque période de mesure, la distribution B, les 580 deuxièmes décharges de chaque période de mesure, et ainsi de suite jusqu'à la distribution E qui regroupe les 580 dernières (cinquièmes) décharges de chaque période de mesure. (fig 5.2.3.1)

On voit sur cette figure que le temps formatif disparaît pratiquement dès la 2^e décharge, mais qu'il est présent directement après la phase d'agitation du diélectrique bien qu'à ce moment le liquide soit immobile. Les temps formatifs sont, dans l'huile immobile, un peu plus petits que dans un diélectrique en mouvement, ils sont quelquefois encore visibles durant les deuxièmes, voire même les troisièmes décharges d'une période de mesure. Remarquons qu'il n'en est pas de même du délai moyen τ_{exp} qui reste constant, à la valeur correspondant à un diélectrique immobile, environ dix fois plus petit que pour le diélectrique en mouvement. (Cette dernière observation est compatible avec un alignement des particules puisqu'à la première décharge, les chaînes doivent être formées). Ces mesures nous ont montré que les temps formatifs ne sont pas liés explicitement à la vitesse du diélectrique. Ceci explique que différentes formes de distributions des vitesses dans le gap (injection ou rotation) ont la même influence sur les temps formatifs, puisqu'elles ne font que permettre la mise en évidence de τ_f .

5.2.3.3 Contradictions Les interprétations précédentes d'origine mécanique, (mouvement de particules, EHD,?) font toutes intervenir la viscosité du diélectrique. Les temps formatifs mesurés devraient donc être sensibles à ce paramètre. Messieurs Frei et Ratajski ont relevé dernièrement une série de mesures en jouant le plus possible sur la viscosité, d'une part en changeant la température du diélectrique, d'autre part, en changeant la nature de ce dernier. Ils n'ont pas remarqué de corrélation entre la viscosité qui variait au minimum d'un facteur 5 et les

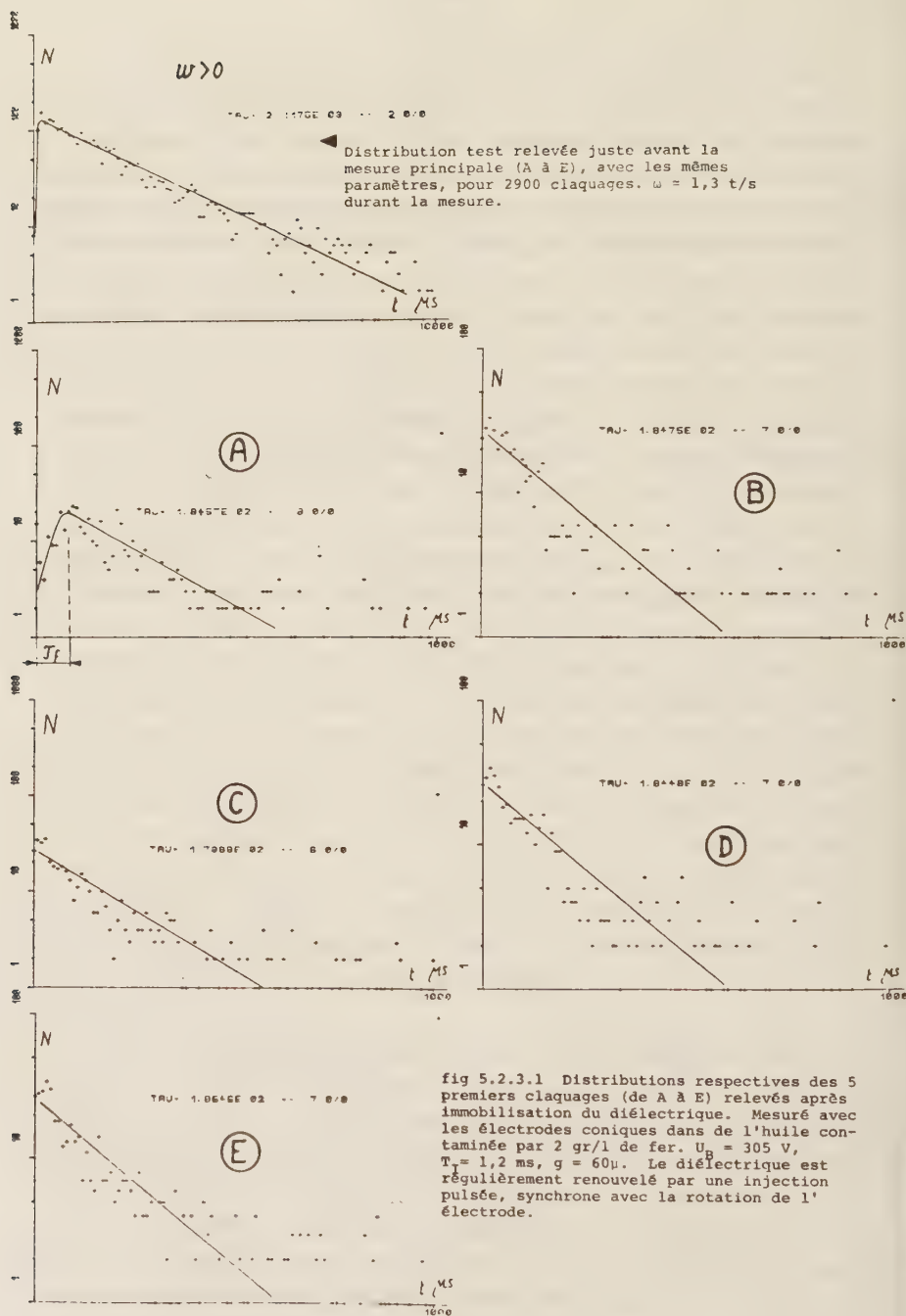


fig 5.2.3.1 Distributions respectives des 5 premiers claquages (de A à E) relevés après immobilisation du diélectrique. Mesuré avec les électrodes coniques dans de l'huile contaminée par 2 gr/l de fer. $U_p = 305$ V, $T_e = 1,2$ ms, $g = 60\mu$. Le diélectrique est régulièrement renouvelé par une injection pulsée, synchrone avec la rotation de l'électrode.

temps formatifs ou les délais moyens. C'est en contradiction avec toutes les explications faisant intervenir la viscosité.

Notons toutefois que la viscosité intervient de manière linéaire alors que le champ électrique intervient avec une puissance supérieure et que ce dernier est assez mal défini dans les modèles mécaniques, ce qui ne doit pas faciliter la mise en évidence d'une influence de la viscosité. Une difficulté supplémentaire est introduite par la granulométrie de nos contaminants, assez mal connue: considérons un modèle mécanique, faisant intervenir le mouvement d'une particule métallique chargée, et reprenons l'équation du mouvement 5.2.2.1 de cette particule. La constante de temps τ_η et v_∞ dépendent plus ou moins fortement des dimensions des particules, τ_η et v_∞ dans une moindre mesure sont donc très dispersés et probablement peu sensibles à une modification de la viscosité. Une connaissance exacte de la granulométrie d'un contaminant pourrait apparemment servir de critère de choix entre EHD et alignements. Nous allons voir (5.3) que ce n'est pas possible car les dimensions des particules interviennent également dans la dépendance en fonction de la surface. Ce choix serait probablement plus facile par le biais des histogrammes des délais en fonction de T_I . Les phénomènes EHD devraient être sensibles à T_I (5.2.3.1) contrairement à l'image que nous nous faisons d'un claquage par un ordre dans le diélectrique.

Le fait que nous ayons mesuré des τ_f dans des huiles décantées (4.6.5.5) donc avec très peu de contamination semble rejeter tout modèle d'alignement de particules, mais n'est pas en contradiction avec l'E.H.D. De même, les très grandes vitesses du diélectrique qui diminuent τ_f et τ_{exp} semblent incompatibles avec des chaînes de contamination. Nous nous reposons la question d'une déformation du gap par les grandes pressions d'injections, explication qui lèverait cette dernière contradiction.

5.3 DISCUSSION DES MESURES EN FONCTION DE LA SURFACE A DES ELECTRODES.

5.3.1 INTRODUCTION Dans beaucoup de mesures faites au cours de ces recherches, nous avons constaté une augmentation de la dispersion et une mauvaise reproductibilité des délais moyens à faibles champs électriques. Pour expliquer la facilité d'amorçage dans de l'huile contaminée, nous avons été obligés d'introduire un "ordre" dans le diélectrique, ordre qui augmente fortement la champ électrique, en jouant sur le gap (notion de gap virtuel), qui est modifié par la présence d'un conducteur dans l'huile. Notons que la présence de ce contaminant ne fait pas que court-circuiter une partie du gap, mais modifie directement un autre paramètre qui influence le délai moyen de claquage: la surface A.

5.3.2 EXTENSION DE LA SURFACE DES ELECTRODES PAR CELLE DES PARTICULES DU CONTAMINANT. La proportionnalité entre la fréquence des claquages et la surface des électrodes suggère un modèle d'amorçage basé sur l'émissivité d'une surface. (qualitativement, car quantitativement il y a un fossé de plusieurs ordres de grandeurs entre l'émission de champ et nos champs apparents de claquage). Partant de cette constatation expérimentale, nous attribuons à une surface A dans un champ électrique E, une probabilité de claquage, respectivement une fréquence moyenne de claquage $f_0 = \tau_{\text{exp}0}^{-1}$ donnée par les mesures dans l'huile propre. Nous pourrions écrire 5.1.1.1 sous la forme:

$$f_0 = \frac{A}{(\tau A)_0} e^{E/E_0}$$

où $(\tau \cdot A)_0$ définit la fréquence moyenne d'amorçage, pour une surface unité, extrapolée pour un champ nul. Une particule conductrice plongée dans un champ électrique homogène E concentre les lignes de champs, sa surface voit donc un champ électrique amplifié d'un facteur ν au maximum. (ν est fonction

de la forme et de l'orientation de la surface dans le champ).
 par exemple, v est au maximum 3 pour une particule sphérique.
 Appelons ΔA la demi surface totale des particules de conta-
 minant au contact d'un champ électrique vE ; nous pouvons de
 même attribuer à cette surface ΔA , une fréquence moyenne de
 claquage f_{Δ} égale à:

$$f_{\Delta} = \frac{\Delta A}{(\tau \cdot A)_0} e^{vE/E_0}$$

Supposons que les claquages initiés sur la surface ΔA des
 particules sont indépendants de ceux générés par la surface A
 des électrodes. Dans ce cas, la fréquence moyenne f des cla-
 quages dans une huile contaminée pourrait être approximée par
 la somme des fréquences:

$$f = f_{\Delta} + f_0 = f_0 \left(1 + \frac{\Delta A}{A} e^{E(v-1)/E_0} \right)$$

ce qui définit un délai moyen τ_{exp} pour l'huile contaminée:

$$f^{-1} = \tau_{\text{exp}} = \frac{\tau_{\text{exp}^0}}{1 + \frac{\Delta A}{A} e^{E(v-1)/E_0}}$$

Le rapport des surfaces $\Delta A/A$ pour des particules sphériques
 de rayon r d'un contaminant de concentration volumique C
 est fonction du gap g :

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{3}{2} \frac{C \cdot g}{r}$$

En substituant on trouve pour le délai moyen en fonction du
 champ électrique apparent E :

$$\tau_{\text{exp}} \cdot A = \frac{(\tau \cdot A)_0 e^{-E/E_0}}{1 + \frac{3}{2} \frac{C}{rE} e^{E(v-1)/E_0}} \quad 5.3.2.1$$

Le dénominateur représente l'influence de la surface du contaminant sur les délais dans l'huile propre du numérateur.

Selon cette formule, $\tau_{\text{exp}} \cdot A$ passe par un maximum, si l'on varie le champ en ajustant le gap comme nous l'avons fait expérimentalement:

- Pour de petits champs électriques, le dénominateur en E^{-1} diverge, ce qui traduit l'augmentation du rapport des surfaces $\Delta A/A$ provoquée par l'augmentation du gap à concentration volumique constante, ce qui augmente la quantité totale de contaminant.
- Pour des champs élevés, les délais moyens diminuent comme $e^{-\nu E/E_0}$. La déformation du champ électrique au voisinage des particules donne une grande influence à leur petite surface ΔA .

Nous avons tracé $\tau_{\text{exp}} \cdot A$ en fonction de différents paramètres dans les figures qui suivent, en prenant pour l'huile propre les délais définis par l'équation 5.1.3.1. Nous avons pris pour ν le rapport expérimental des pentes des mesures à 250 V tiré de la figure 4.4.4.2 pour l'huile contaminée C1 (par rapport à la formule 5.1.3.1 pour l'huile propre: $\nu = 6,5$. D'autre part, C1 est défini par $C = 1,4 \cdot 10^{-3}$, $r = 1,5 \mu$. Numériquement 5.3.2.1 devient:

$$\tau \cdot A = \frac{3,15 \cdot 10^7 e^{-E/47,7}}{1 + \frac{15 C U_B}{rE} e^{5,5E/47,7}}$$

Le résultat $\tau_{\text{exp}} \cdot A$ est en $\mu s \text{ cm}^2$ pour E en kV/cm , r en μm et U_B en V .

Afin d'apprécier par comparaison, l'abaissement des τ_{exp} provoqués uniquement par la surface ΔA du contaminant, nous avons reporté dans ces graphiques en traits pleins les mesures dans

de l'huile propre (équation 5.1.3.1) et les résultats pour l'huile contaminée avec C1 relevés respectivement sous $U_B = 250$ V et $U_B = 80$ V.

La figure 5.3.2.2 montre l'influence d'un changement de concentration sur les délais statistiques.

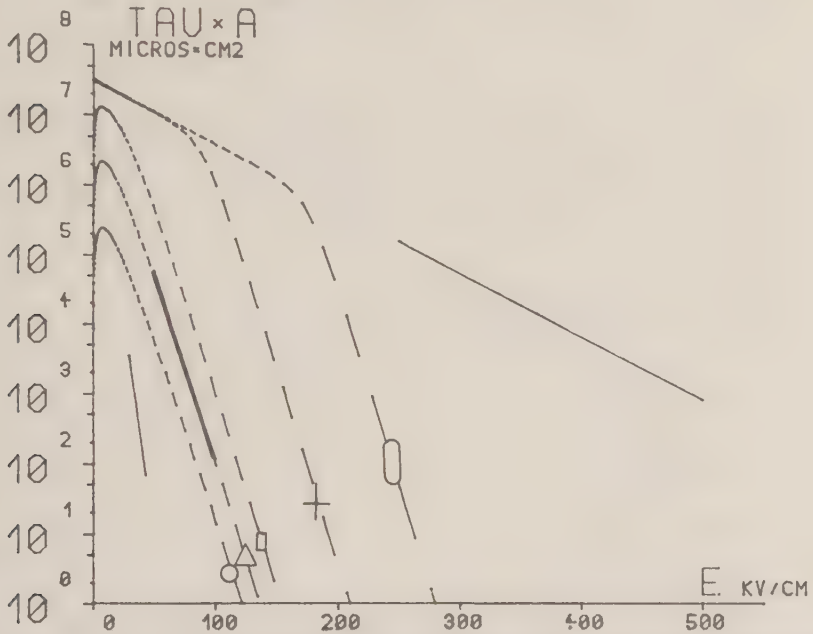


fig 5.3.2.2 Délais moyens calculés en fonction du champ électrique apparent, pour diverses concentrations de C1. La superposition entre le résultat expérimental mesuré et le calcul est obtenue pour $C = 10 \cdot C1$

o: $C = 0,14$ + $C = 10^{-6}$
 Δ : $C = 1,4 \cdot 10^{-2}$ $\square$ $C = 10^{-10}$
 $\square$: $C = 1,4 \cdot 10^{-3} = C1$

On constate qu'un changement de concentration à champ constant translate les délais statistiques et ce, d'autant plus, que la concentration est grande. Pour ces fortes concentrations, on retrouve en première approximation l'équation d'état 4.5.3.4 ou 4.4.4.5 : $\tau_{exp} \cdot A \cdot C = cte$. Une explication de l'abaissement des délais moyens, basée uniquement sur la surface ΔA des particules, nous obligerait à augmenter d'un facteur 10 la concentration de contaminant C1 pour obtenir une bonne concordance

quantitative entre le délai calculé en partant du champ électrique apparent, et le délai mesuré. Pour la bonne concentration, ce facteur 10 peut indifféremment se reporter sur la granulométrie, ou encore sur la tension de claquage. (figures suivantes). (Ce facteur pourrait être diminué en introduisant un champ électrique fonction de la concentration de contaminant, ou en prenant pour l'huile propre les mesures de Brignell et Metzmacher).

Sur la figure 5.3.2.3 nous avons varié la granulométrie du contaminant. On retrouve une diminution des délais, à concentration constante, pour une poudre plus fine (comparer avec les figures 4.4.3.2 et 4.4.4.4).

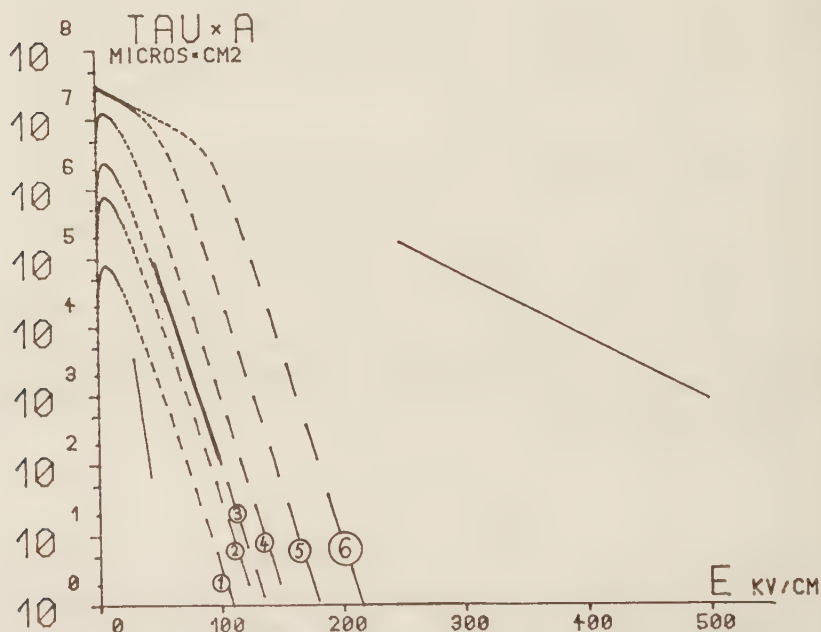


fig 5.3.2.3 Délais moyens calculés en fonction du champ électrique apparent, pour de l'huile contaminée avec C1, dont on varie la granulométrie. La superposition du résultat calculé sur le résultat mesuré est obtenue pour un diamètre 10 fois plus petit que le diamètre mesuré de C1 = 3 μ

- | | |
|---------------------------------|------------------------|
| 1 diamètre = 10 ⁻² μ | 4 diamètre = 3 μ (=C1) |
| 2 diamètre = 10 ⁻¹ μ | 5 diamètre = 100 μ |
| 3 diamètre = 0,3 μ | 6 diamètre = 1 cm :: |

La concordance de cette formule cesse lorsqu'on prend comme paramètre la tension de claquage U_B : fig 5.3.2.4. A champ électrique constant, elle donne une diminution des délais de claquage pour une augmentation de la tension de claquage, ce qui est contraire à nos observations. (par exemple fig 4.7.1.1).

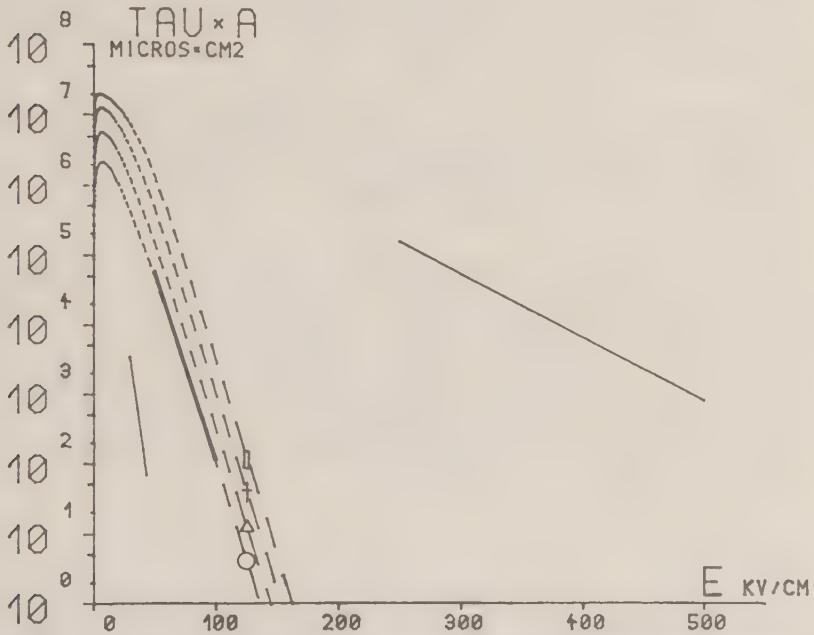


fig 5.3.2.4 Délais moyens calculés pour diverses tensions d'amorçage U_B dans de l'huile contaminée C1. Pour obtenir une correspondance entre le calcul et les résultats expérimentaux, il faut introduire dans le calcul une tension U_B 10 fois trop grande.

□: $U_B = 80$ V Δ: $U_B = 815$ V
 +: $U_B = 250$ V ○: $U_B = 2500$ V

Nous avons tenté, sans succès, de faire un calcul analogue en partant de l'équation de Fowler Nordheim, comme référence pour l'huile propre, et en examinant ensuite l'influence de l'adjonction d'un contaminant.

5.3.3 MESURES TESTS Nous avons mis en évidence un maximum dans la courbe des délais moyens en fonction du champ électrique, semblable à celui décrit par l'équation 5.3.2.1. Comme précédemment, nous avons relevé les mesures avec une tension de claquage U_B constante, le champ électrique est ajusté en variant le gap. Ce maximum n'est pas toujours très marqué et pour les très faibles champs, donc pour les très grands gaps, les délais moyens augmentent à nouveau (à gauche du maximum) fig 5.3.3.1.

La présence d'un maximum est indépendante de la vitesse de rotation. Pour tester quantitativement l'équation 5.3.2.1, il faudrait maîtriser les problèmes de granulométrie.

Une série de mesures pour différents gaps constants et U_B variable fournit une confirmation supplémentaire de l'influence de la surface des particules: en procédant de la sorte, la quantité de contaminant dans le champ électrique est constante, donc la surface de ce contaminant l'est également, nous n'avons pas réussi à mettre en évidence un maximum dans la courbe des délais moyens. fig 5.3.3.2

Remarques:

- Sur la figure 5.3.3.2 les délais moyens ne semblent presque dépendre que du champ électrique. Un facteur ≈ 2 dans les tensions d'amorçage est à peine perceptible sur les délais d'amorçage, ce qui est loin d'être le cas sur la figure 5.3.3.1 Cette remarque mérite d'être soigneusement contrôlée expérimentalement.

- Les mesures à gap constant avec mouvement du diélectrique confirment que les temps formatifs diminuent pour une augmentation du champ électrique, ce qui n'était pas très net sur la fig 4.6.5.4.

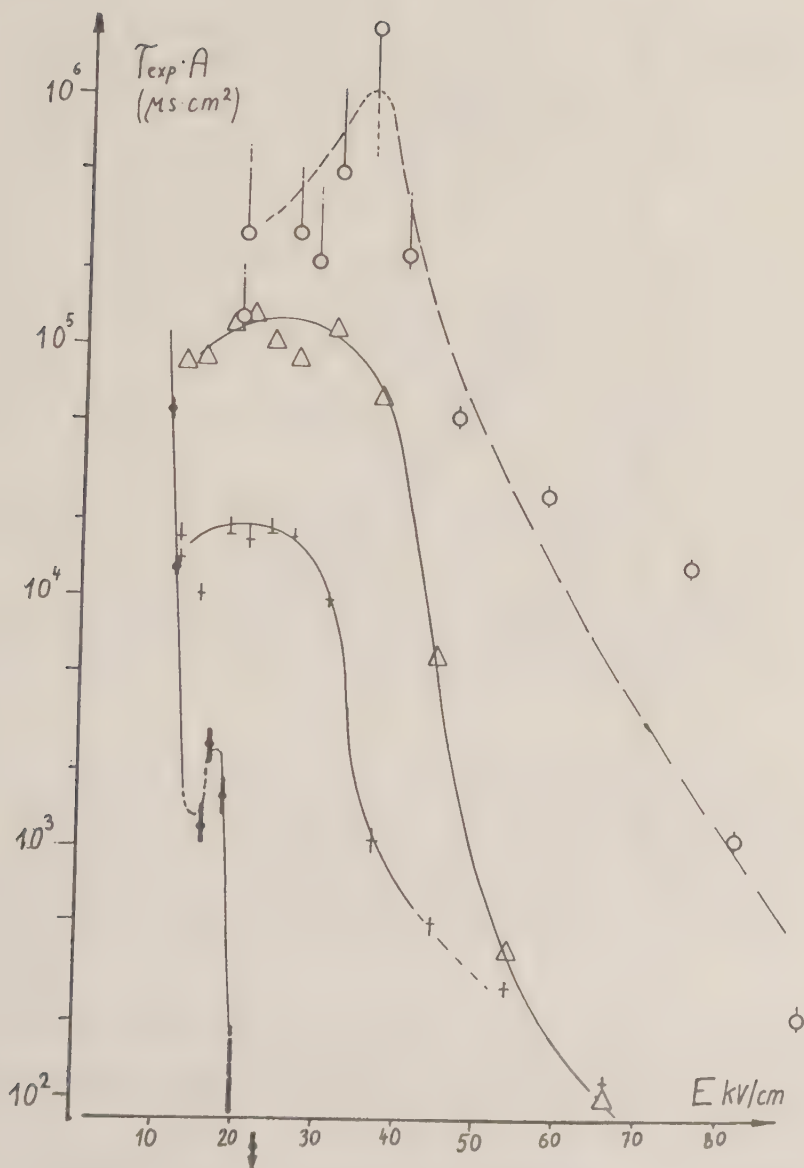


Fig 5.3.3.1 Délais moyens en fonction du champ électrique relevés pour plusieurs tensions U_B constantes, dans de l'huile contaminée par 2 gr/l de poudre de fer. Mesures faites avec l'électrode p-v conique. $T_I = 900 \mu s$

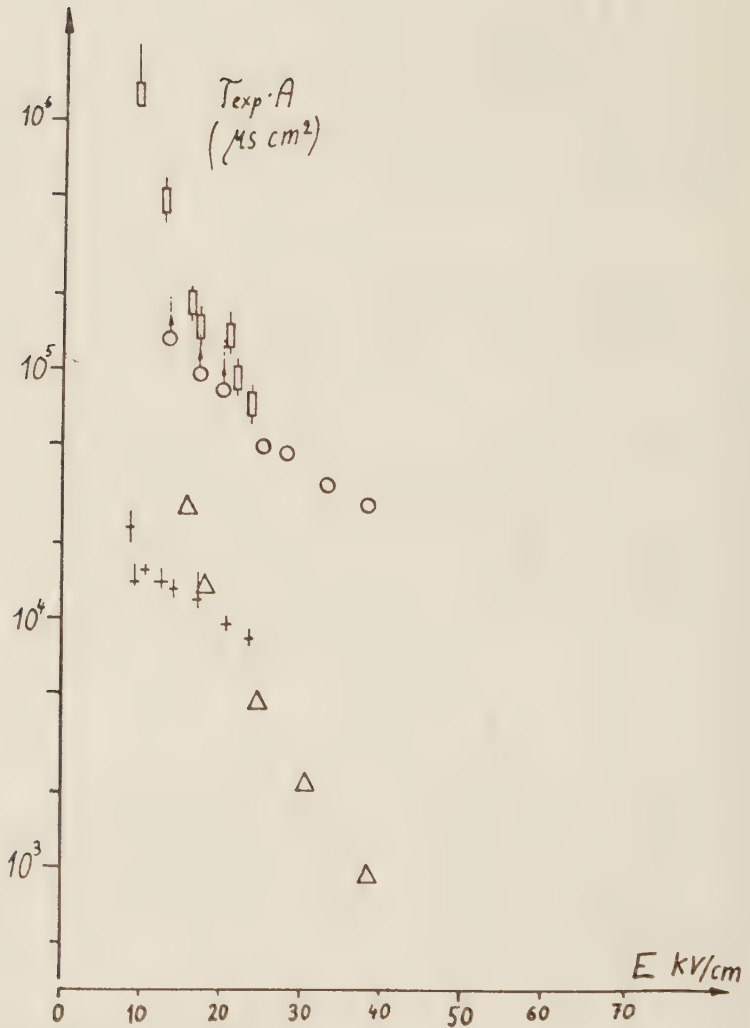


fig 5.3.3.2 Délais moyens en fonction du champ électrique relevés pour divers gaps constants, dans de l'huile contaminée par 2 gr/l de poudre de fer. Mesures faites avec l'électrode p-v conique. $I_A = 1 \text{ A}$, $T_I = 900 \text{ } \mu s$

o: $v = 23 \text{ cm/s}$, gap = 75 μ
 Δ : $v = 0$, gap = 75 μ
 $\square$: $v = 23 \text{ cm/s}$, gap = 125 μ
 $+$: $v = 0$, gap = 125 μ

5.4 EXTRAPOLATIONS DES RESULTATS ET CONCLUSIONS

Les hypothèses avancées au cours du chapitre 5 ne parlent pas directement et explicitement du processus physique qui conduit au claquage. Il n'y a pas longtemps, nous rejetions encore tout modèle basé sur une contribution mécanique, car nous n'avions pas encore observé des temps formatifs, pas même pour des délais moyens τ_{exp} inférieurs à la microseconde.

Les distributions mesurées avec les électrodes tournantes nous permettent une réconciliation quantitative et qualitative de nos mesures avec celles relevées dans des diélectriques purifiés, moyennant l'introduction d'un ordre géométrique dans le diélectrique (gap virtuel). L'influence de la surface, étroitement liée au champ électrique, sur les délais moyens, rafraîchit singulièrement les modèles basés sur l'émissivité des surfaces que nous rejetions pour des raisons quantitatives. Les progrès de la physique des surfaces (par exemple { 21 }) associés à la recherche des temps formatifs intrinsèques de l'amorçage, c'est-à-dire à un élargissement de notre plage des champs électriques, devraient permettre d'aborder la description détaillée d'un claquage.

Nous nous sommes volontairement limités aux paramètres dont nous connaissons l'influence sur les délais moyens, pour tenter d'expliquer la facilité d'amorçage provoquée par une relativement petite quantité de contaminant. Les diverses explications proposées ne suffisent de loin pas, individuellement, à décrire le claquage d'un diélectrique contaminé. Il reste un certain nombre de contradictions majeures à éclaircir.

A défaut d'avoir réponse à tout (!) ce travail a apporté quelques pièces plus ou moins disséminées dans le grand "puzzle" de l'amorçage. D'une part, ces pièces mettent en évidence les lacunes qu'il reste à combler, elles en définissent les contours; d'autre part, elles devraient permettre de rejeter un peu plus facilement les éléments ne faisant pas partie de cette image.

Bernard Bommeli.

B. Bommeli
5. 9. 78.

R E M E R C I E M E N T S

Ce travail est issu d'une heureuse collaboration entre les "Ateliers des Charmilles" et l'Ecole de Physique de l'Université de Genève.

Je désire remercier l'équipe universitaire composée du Dr. Charles Frei, de Messieurs Ulrich Rudolf, André Ratajski et chapeautée par le Professeur Martin Peter, pour l'attention avec laquelle elle a suivi ces recherches, tout en me laissant la grande liberté de les orienter dans une direction particulière, ce qui les a rendues fort intéressantes.

Ma reconnaissance va également à Monsieur Gérard Rey Mermier qui a résolu avec beaucoup de compétence et d'efficacité les problèmes d'électronique rencontrés. L'atelier de l'Ecole de Physique mérite des félicitations pour la précision apportée aux réalisations mécaniques indispensables à cette étude.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Jean Pfau, Directeur des Ateliers des Charmilles S.A., ainsi qu'à ses proches collaborateurs, pour l'intérêt témoigné à cette thèse et pour le soutien matériel qu'ils lui ont apporté.

Je suis sincèrement reconnaissant au Professeur H. House pour le temps qu'il a bien voulu consacrer à l'étude de cette thèse et pour sa participation au jury de cette dernière.

Madame Evelyne Rey Mermier a soigneusement et rapidement dactylographié ce travail, je la remercie vivement pour son aide spontanée et précieuse.

Que les divers instituts et industries de la place qui ont généreusement répondu aux problèmes et demandes qui leur ont été adressés soient ici remerciés pour leur disponibilité.

B I B L I O G R A P H I E

- {1} - U. RUDOLF Etude statistique de l'amorçage
de décharges électriques dans des
liquides contaminés (1977)
- Thèse no 1811, Uni. Genève (1977)
- {2} - J.A. KOK Electrical breakdown of insulating
liquids.
- Philips Technical Library (1961)
- {3} - T.J. GALLAGHER Simple dielectric liquids.
- Oxford University Press (1975)
- {4} - C. FREI,
 E. PERREARD
 M. PETER On the breakdown mechanism of re-
curring discharges in a liquid
dielectric.
- Helv. Phys. Acta 45, 778 (1972)
- {5} - P-A. SCHEIDECGER Mesure statistique des délais d'
amorçage dans un diélectrique
liquide contaminé.
- Travail de diplôme, Uni.Genève (1975)
- {6} - F.BALLEYS,
 B. BOMMELI
 C. FREI Etude de la distribution spatiale
des décharges en électroérosion.
- Annals of the CIRP Vol 22/I (1973)
- {7} - B. BOMMELI A discharge coordinate detection
system.
- Revue de physique appliquée tome 12
(décembre 1977)
- {8} - B. BOMMELI Mesure de la distribution spatiale
du nombre d'étincelles, lors d'un
processus d'électroérosion dans un
diélectrique liquide.
- Travail de diplôme Uni.Genève (1972)
- {9} - B. BOMMELI Distributions spatiales des décharges
- Rapport interne aux Ateliers des
Charmilles (17.4.74)

- {10} - C. FREI

Limitation in controlling process parameters of EDM due to the stochastic nature of the discharge.

- ISEM-5 Proceedings (1977)
- {11} - F. BALLEYS
C. FREI
E. MANZIN

Elektrodenkurzschlüsse in der Elektroerosion.

- Fertigung 5, 147 (1973)
- {12} - R. SNOEYS, H. CORNE-
LISSEN, J-P. KURTH

Analysis of the EDM process

- ISEM-5 Proceedings (1977)
- {13} - N. FELICI

Phénomènes hydro et aérodynamiques dans la conduction des diélectriques fluides.

- Revue Générale d'électricité (196
- {14} - N. FELICI
J-P. COSSE

La conduction dans les liquides diélectriques. Aspects électrochimiques et électrodynamiques.

- Revue Générale d'électricité (197
- {15} - J.E. BRIGNELL

Statistical nature of breakdown sequences in a liquid insulant.

- IEE proceeding vol 113 no 10 (196
- {16} - B. BOMMELI
C. FREI
M. PETER

Memory effect in dielectric liquids being subjected to recurring discharges.

- ICCDL-5 Proceeding Delft Uni. Press (1975)
- {17} - J.E. BRIGNELL
K.D. METZMACHER

Dependence of the statistical breakdown time-lag of a liquid dielectric on electrode geometry.

- J. Phys D: Appl. Phys vol 4 (1971
- {18} - B. BOMMELI
C. FREI
A. RATAJSKI

The influence of dielectric motion on breakdown time-lag distributions

- ICCDL-6 Proceeding Ed. Frontières F 1978

- {19} - L. CENTURIONI Dielectric breakdown of flowing liquid, nitrogen under D.C. and A.C. voltage.
B. DELFINO
G. MOLINARI
A. VIVIANI
- ICCDL-5 Proceeding Delft Uni. Press (1975)
- {20} - J.K. NELSON Electric strength of transformer oil for large electrode.
B. SALVAGE
W.A. SHARPLEY
- IEE Proceeding no 118,2,388 (1971)
- {21} - J.R. SCHIEFFER, Surface physics.
P. SOVEN, J. ESTRUP,
W. PLUMMER,
J.W. GADZUK,
D.R. PENN
- Physics Today / April 1975, October 1975
- A.W. PALMER A statistical analysis of the light pulses emitted before electrical breakdown of a liquid dielectric.
H. HOUSE
- J. Phys D: Appl Phys vol 5 (1972)
- DE BOER Electron emission and adsorption phenomena.
- The Cambridge series of physical chemistry (1935)
- P. FELSENTHAL Enhanced charge transfer in dielectric fluids containing conducting particles.
B. VONNEGUT
- Brit J appl. phys. vol 18 (1967)
- G.B. DENEGRI A contribution to the study of low field conduction by impurity particles in a dielectric liquid.
- ICCDL-5 Delft Uni. Press (1975)

